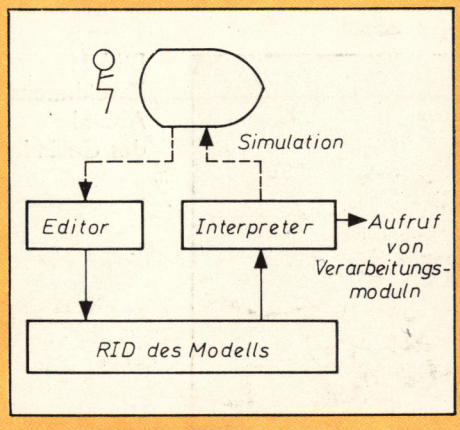
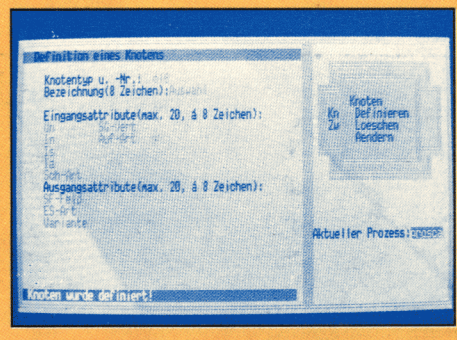
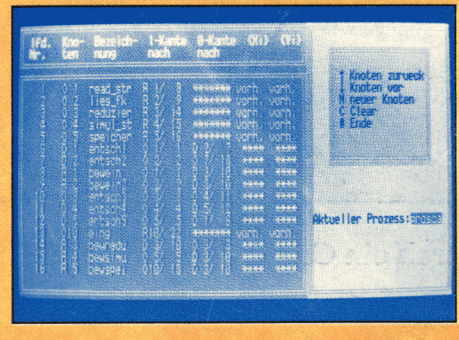
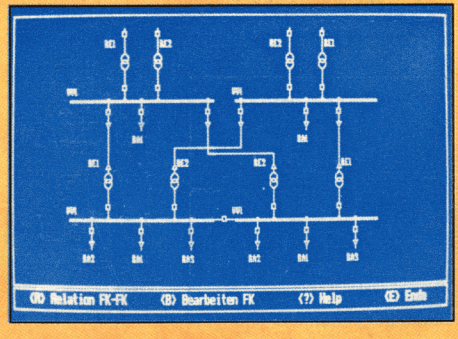
ELEKTRIE 3|89

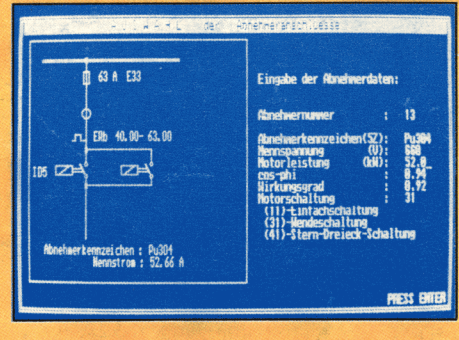
VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013—5399











Entwurf von CAD-Systemen: Kooperation von Fachdisziplin und Informatik

Mit Beiträgen
der TU Dresden, Sektion Elektrotechnik und
der TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen,
zur Wissenschaftlichen Konferenz 1989

0120222

Zum Beitrag von M. Groß und H.-J. Koglin

Computergestützte Freileitungsplanung unter dem Aspekt der Sichtbarkeit

(s. Seite 101—105)

Simulation eines Freileitungs-Abschnittes auf dem Bildschirm

durch ein Bildverarbeitungsprogramm zur Darstellung der Topographie

Bild 11
Zweidimensionales Abbild des Geländes

durch ein Graphikprogramm zur Darstellung der Perspektive

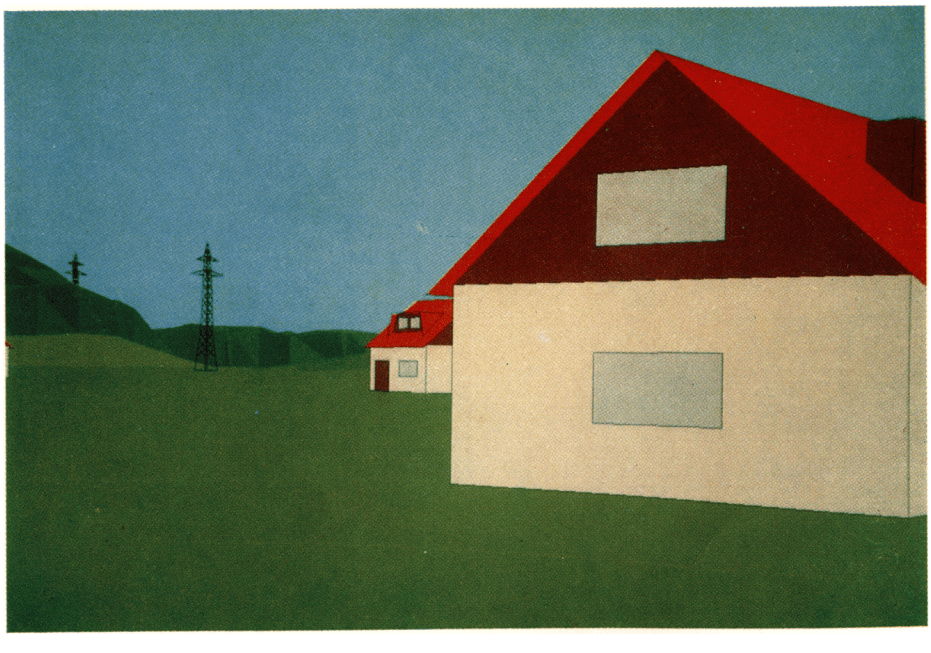


Bild 12
Dreidimensionale Rekonstruktion der Szenerie

BS: 500/1140/ BR: 0/850, $\varepsilon b = 25\ \%$
$S''_{\text{Mast 1}} = 9{,}481 \cdot 10^{-6}\ \text{sr/m}^2$
$S''_{\text{Mast 2}} = 5{,}161 \cdot 10^{-5}\ \text{sr/m}^2$

3|89 ELEKTRIE

43. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013–5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Goldene Ehrenplakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. Dr. h. c. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Obering. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kablsch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e.h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G.Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. Hannella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

Titelbild

Die Entwicklung und die Wartung komplizierter TEVO-Prozesse von Elektroenergieanlagen sind nur mit Rechnerunterstützung möglich. Nach der Theorie der Prozeßablaufgraphen wurden Knoten und Kanten definiert und das Software-Tool ESIP (Entwurf und Simulation interaktiver Prozesse) entwickelt.
Unser Bild zeigt den Bildschirminhalt für die Definition eines Operationsknotens. Siehe Beitrag auf den Seiten 99 bis 101

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

Inhalt

Seite

Aktuelle Information 82

Altmann, S.
Computerintegrierte Systeme für die industrielle Energietechnik 83

Ambrosch, H.
Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Pundt zum 60. Geburtstag 84

Fachaufsätze

Ambrosch, H.; Bauer, H.
Mathematische Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit von Leistungsschalterkombinationen bei Längs- und Querfehlern 85

Oswald, B.
Zeitskalierte Modellierung des Elektroenergiesystems 88

Erlich, I.
Berechnung elektromagnetischer Ausgleichvorgänge mit dem PC-Programm NEDYN 92

Krause, J.
Schnelle, elektromagnetische Ausgleichvorgänge beim Schalten von Hochspannungs-Asynchronmotoren 96

Heinze, D.; Butz, U.
Rechnerunterstützter Entwurf von CAD-Systemen für Elektroenergieanlagen 99

Groß, M.; Koglin, H. J.
Computergestützte Freileitungsplanung unter dem Aspekt der Sichtbarkeit 101

Dittrich, G.
Entscheidungsmodelle in Expertensystemen 105

Küttner, H.
Fehlerwahrscheinlichkeitsorientierter Einsatz von Überspannungsschutzeinrichtungen in NS-Anlagen 107

Großmann, St.; Böhme, H.
Zum Langzeitverhalten von Steckverbindungen der Elektroenergietechnik 110

Weigt, A.
Sicherheitstechnische Bewertung technologischer Prozesse in der Fertigung des Elektroenergieanlagenbaues 111

Baier, P.; Kröber, Th.
Nachweis der Elektroenergiequalität durch Flickermessung 112

Umschau

Kurzberichte 115

CIGRE — 32. Session 116

Fachtagungen 118

AKTUELLE INFORMATION

Schaltgeräte, Steuer- und Regelgeräte für Niederspannungsanlagen

Stand, Entwicklung, Probleme beim Einsatz

Informationstagung

Zeit: 30. Mai 1989
Ort: Hohenstein-Ernstthal, Kreiskulturhaus
Veranstalter: Bezirksfachausschuß „Elektrotechnische Anlagen" beim BV Karl-Marx-Stadt der Kammer der Technik

Anfragen

Kammer der Technik
BV Karl-Marx-Stadt
— Tagungsorganisation —
Tel.: 62141
Annaberger Str. 24
Karl-Marx-Stadt
9001
G. Heliosch, Karl-Marx-Stadt EA 3064

Forschung und Ausbildung für die Energiewirtschaft — 20 Jahre Technische Hochschule Zittau

IX. Wissenschaftliche Konferenz für Energiewirtschaft

Zeit: 7. bis 9. Juni 1989
Ort: TH Zittau
Veranstalter: TH Zittau

Inhaltliche Schwerpunkte

- Methoden und Verfahren zur kurz-, mittel- und langfristigen Gestaltung von Energieversorgungssystemen
  - — Leitung, Planung und Ökonomie der Entwicklung der Gesamtenergiewirtschaft und ihrer Teilsysteme
  - — Leitung und Planung von Struktureinheiten, der Modernisierung und Rekonstruktion von Energieumwandlungs- und Übertragungsanlagen
- Kohle- und Kernkraftwerke
  - — Verbrennung und Senkung der Schadstoffemission
  - — Kernkraftwerkstechnik
  - — Kraftwerkstechnik
- Stand und Perspektive der Hauptausrüstungen für Elektroenergie-Verteilungsanlagen
  - — Anforderungen an Mittelspannungs-Schaltanlagen
  - — Technische Konzeption moderner Mittelspannungs-Schaltanlagen für hohe und niedrige Energiedichten
  - — Technische Konzeption moderner Niederspannungs-Schaltanlagen und deren Komponenten für einen breiten Anwendungsbereich
- Rationelle Energienutzung und Umweltschutz
  - — Niedertemperatur-Energienutzung
  - — Energieeinsparung durch Intensivierung
  - — CAD/CAM-Lösungen für den rationellen Energieeinsatz
- Instandhaltung und Technische Diagnostik
  - — Systeme der Anlagenüberwachung und Technischen Diagnostik/Expertsysteme
  - — Erhaltungs- und Rekonstruktionsstrategie für Energieanlagen
  - — Einsatz der Datenverarbeitung in der Instandhaltung
- Automatisierung energetischer Prozesse
  - — Kraftwerksautomatisierung
  - — Automatisierung in Elektroenergiesystemen
- Energie und Gesellschaft
  - — Das Energieproblem, seine verschiedenen weltanschaulichen Reflexionen und Lösungskonzeptionen sowie seine Verflechtung mit dem Problem der Friedenssicherung und dem Umweltproblem
  - — Energieökonomie in der umfassenden Intensivierung; reproduktionstheoretische und volkswirtschaftlich-praktische Probleme und Lösungen
  - — Historische und gegenwärtige Fragen der energiewirtschaftlichen Entwicklung
- Wissenschaftliche Rahmenveranstaltungen
  - — X. Zittauer Kernenergiegespräch
  - — Errichtung von Kernkraftwerken
  - — Rationelle Energieanwendung
  - — Regimesteuerung von Elektroenergieversorgungsnetzen
  - — Entwicklungstendenzen in der Verrechnungstechnik für Elektroenergie
  - — Geschichtsschreibung in der Energiewirtschaft

Anfragen

Technische Hochschule Zittau
Theodor-Körner-Allee 16
Zittau
8800
Tel.: Zittau 610
Telex: 284240
G. Schumann, Zittau EA 2798

Meß- und Automatisierungstechnik für die rationelle Betriebsführung von thermischen Energieanlagen

5. Kolloquium „Meßtechnik für thermische Energieanlagen" (XXI. Kraftwerkstechnisches Kolloquium)

Zeit: 28. und 29. November 1989
Ort: Dresden, Plenar- und Festsaal des Dresdner Rathauses

Veranstalter: Die Sektion Energieumwandlung der Technischen Universität Dresden gemeinsam mit dem Rat des Forschungsprogrammes „Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen der Energiewirtschaft" des Ministeriums für das Hoch- und Fachschulwesen, der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik der KDT, der wissenschaftlichen Sektion Elektroenergie der Wissenschaftlich-Technischen Gesellschaft für Energiewirtschaft der KDT und dem Industriezweigaktiv Kraftwerksanlagenbau der KDT

Inhaltliche Schwerpunkte

- — Sensorentwicklung und Meßverfahren
- — Gerätetechnik und Konzepte zur Automatisierung der Betriebsüberwachung und Diagnostik
- — Untersuchungen zu entscheidenden Teilproblemen der Meß- und Automatisierungstechnik
- — Ausbildungsfragen zur Meß- und Automatisierungstechnik

Anfragen

und Vortragsanmeldungen sind zu richten an:
Technische Universität Dresden
Sektion Energieumwandlung
WB Meß- und Automatisierungstechnik
Prof. Dr. sc. nat. *D. Netzband*
Mommsenstraße 13
Dresden
8027
Telefon: 463 51 20 und 463 53 08
D. Netzband, Dresden EA 2891

Aufsetzmethode in der Leiterplattentechnik unter Berücksichtigung der Nacktchipverarbeitung

Fachtagung mit internationaler Beteiligung aus den RGW-Ländern

Zeit: 21. und 22. Dezember 1989 (Neuer Termin)
Ort: Berlin
Veranstalter: Fachverband Elektrotechnik in der Kammer der Technik; Wissenschaftliche Sektion Technologie des elektronischen Gerätebaus

Inhaltliche Schwerpunkte

Möglichkeiten und Grenzen der Baugruppenrealisierung

- — Monolithische Integration
- — Hybride Integration
- — SMD-Technologie
- — Nacktchipverarbeitung

Voraussetzung zur Einführung der Aufsetzmontage für SMD und Nacktchip

- — Bauelementesortiment, Bauelementeverpackung
- — Trägersysteme
- — Hilfsmaterialien (Kleber, Lötpasten, Lote, Mikrodrähte, Verkappung)
- — Bestückungstechnik
- — Meß- und Prüftechnik

Verfahren und Ausrüstungen

- — CAD von Leiterplatten, u.a. von Trägersystemen
- — Fixierung und Kontaktierung der Bauelemente
- — CAQ
- — Reparaturmöglichkeiten der Baugruppen
- — Spezialausrüstungen

Anwenderbeispiel

- — SMD-Technik
- — Nacktchipverarbeitung (einschließlich Kundenwunschschaltkreise)

Fachspezifische Ausstellung

- — Baugruppenmuster
- — Sondergeräte
- — Software für CAD, CAM, CAQ und weitere nachnutzbare Unterlagen

Anfragen

und Vortragsvorschläge (Termin 31. 05. 1989) sowie Ausstellungsangebote (Termin: 31. 05. 1989) sind schriftlich zu richten an
Kammer der Technik
Präsidium
Fachverband Elektrotechnik
Clara-Zetkin-Str. 115/117
Berlin
1086
H. Hoppe, Berlin EA 3017

Computerintegrierte Systeme für die industrielle Energietechnik

Von

Prof. Dr. sc. techn. Siegfried Altmann, Direktor der Sektion Elektroenergieanlagen der Technischen Hochschule Leipzig,

Vorsitzender der Bezirksfachsektion Elektrotechnik/Elektronik Leipzig der Kammer der Technik und Mitglied des Wissenschaftlichen Rates der Hauptforschungsrichtung Elektroenergetik beim Ministerium für Hoch- und Fachschulwesen und der Akademie der Wissenschaften der DDR

Unter dieser Thematik führt die Sektion Elektroenergieanlagen der Technischen Hochschule Leipzig in der Zeit vom 10. bis 12. Oktober 1989 in Leipzig ihre 4. Wissenschaftliche Konferenz (WK 89) durch.
Referenten aus der UdSSR, der Ungarischen VR, der VR Polen, der VR Bulgarien, der ČSSR, der Schweiz, Italien, Finnland, BRD, Berlin (West), Österreich, Syrien und aus Griechenland haben sich bereits angemeldet. Die WK 89 widmet sich den Problemen der steigenden Anforderungen an die theoretische Aufbereitung der Prozesse der Entwicklung, technischen Vorbereitung, Herstellung und des Betreibens von Elektroenergiesystemen in ihrer Einheit als Grundlage und Voraussetzung der Entwicklung und Realisierung computerintegrierter Systeme für die industrielle Elektroenergietechnik.

In den einzelnen Sessionen werden folgende Schwerpunktprobleme behandelt (Sessionen):

1. Die Sicherheit elektrotechnischer Anlagen und die der Kernkraftwerke
2. Rechnerintegrierte Elektroantriebssysteme
3. Konstruktion und Herstellung von Elektroenergieanlagen
4. Entwurf und Betrieb von Netzen in Industrie und Kraftwerken
5. CAD- und Prozeßleittechnik — Software für Elektroenergieanlagen.

An dieser Stelle soll eine Auswahl bisher angemeldeter Vorträge genannt werden, um auch zu demonstrieren, wie das internationale Interesse der Veranstaltung gewachsen ist.

Session 1

— Prof. Birolini, Schweiz
Prüf- und Vorbehandlungsstrategien elektrotechnischer Bauteile und -gruppen
— Dr. Niehaus, Österreich
Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) als Beitrag zur Sicherheit von Kernkraftwerken
— Dr. Driedger, BRD
Grundlegende Überlegungen zur Bewertung der Sicherheit komplexer Systeme

Session 2

— Prof. Braslowskij, UdSSR
Theorie und Methoden der Synthese der vielfunktionalen, mit Spannung geregelten Thyristorasynchronantriebe

Session 3

— Prof. Kusnezow, UdSSR
Automatische Anlage zur Regulierung der Elektroenergieversorgung für den technologischen Prozeß des Punkt- bzw. Widerstandsschweißens
— Prof. Kordus, VR Polen
Mikroprozessorsteuergerät für Netzfrequenzautomatik mit df/dt-Element
— Prof. Koglin, Dr. Groß, BRD
Rechnergestützte Freileitungsplanung unter dem Aspekt der Sichtbarkeit
— Prof. Triandafillidis, Griechenland
Neue Elektrotechnologie mit Prozeßrechentechnik und ihr Einfluß auf die Betriebsmittel-Gestaltung und HS-Ing.-Ausbildung

Session 4

— Dr. Oswald, Prof. Rotundale, DDR/Italien
Nichtstationäre Betriebsvorgänge in industriellen EES
— Prof. Pfeiffer, BRD
Computerunterstütztes Meßsystem zur Erfassung und Verarbeitung von Teilentladungsmeßdaten aus Langzeituntersuchungen

Session 5

— Dr. Nielsen, BRD
Probleme und Lösungen beim Einsatz von relationalen Datenbanken und Netzleitanlagen
— Dr. Styczynski, VR Polen
Ausnutzen der Paretolösungen bei der Entwicklung eines Expertensystems für die Projektierung von EV-Netzen

Insgesamt stehen etwa 100 Vorträge auf dem Programm.

Im vorliegenden Heft werden Zwischenergebnisse zu den genannten Problemen zur Diskussion gestellt. An dieser Stelle sei auch auf die Hefte 12/1987 und 5/1989 der gleichen Fachzeitschrift verwiesen. EA 3019

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Pundt zum 60. Geburtstag

Am 28. April 1989 gratulieren wir Prof. Dr.-Ing. habil. *Hans Pundt*, ordentlicher Professor für Elektrotechnik (Netzplanung und Netzberechnung) und Leiter des Wissenschaftsbereichs Elektroenergietechnik an der Technischen Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik, zu seinem 60. Geburtstag!

Seit fast 25 Jahren Hochschullehrer, hat Prof. *Pundt* eine ganze Generation von Absolventen erzogen, hat 30 Doktoranden bei ihrer Promotion zum Dr.-Ing. und 2 Doktoranden bei ihrer Promotion zum Dr. sc. techn. betreut. Sein in 2. Auflage erschienenes Lehrbuch „Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze", Bd. I „Mathematische Grundlagen und Netzparameter" (gemeinsam mit Prof. *Koettnitz*), die Lehrbriefreihe Elektroenergiesysteme, die Lehrbriefe „Elektroenergietechnik" und das von ihm zusammengestellte Wissensspeicherheft „Elektroenergiesysteme" der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden sind nicht nur bei den Studenten der TU Dresden bekannt, sondern werden auch an anderen Hochschulen unseres Landes gern verwendet.

Das temperamentvolle und engagierte Auftreten von Prof. *Pundt* hat nicht nur zu einem sehr engen Kontakt zu seinen Studenten, Assistenten und Aspiranten geführt, sondern auch zum Erfolg vieler Tagungen und wissenschaftlicher Konferenzen im In- und Ausland beigetragen unabhängig davon, ob er die Veranstaltung selbst organisiert und geleitet hat, als Referent, Diskussionsleiter oder auch „nur" in der Diskussion zu Wort kam. Dabei hat er neben der Vorstellung eigener Arbeitsergebnisse stets auch Übersichten über die Einordnung dieser Ergebnisse in das Wissen unserer Zeit und in die historische Entwicklung, insbesondere die Entwicklung nach 1945, erarbeitet.

Prof. *Pundt* hat nach einer Lehre als Elektromaschinenbauer in einem Vorbereitungskurs für das Hochschulstudium (ABF) 1949 das Abitur abgelegt. Von 1949 bis 1954 studierte er an der damaligen Technischen Hochschule Dresden, Fachrichtung Starkstromtechnik, und diplomierte bei Prof. *Wengner* mit dem Thema „Berechnung des Wirkreststroms bei Erdschluß im sächsischen 110-kV-Netz und Untersuchung über das Verhalten des Erdschlußschutzes durch Erdschlußrelais".

Nach Abschluß des Studiums zunächst als Dispatcher in der Staatlichen Hauptlastverteilung in Berlin tätig, kam *H. Pundt* bald nach Dresden in den damaligen VEB Verbundnetz Ost (heute Netzbetrieb Dresden im Kombinat Verbundnetz Energie) zurück. Er begann als Projektierungsingenieur für Hochspannungsfreileitungen, war später in der Gruppe Netzberechnung tätig und dann bis 1963 Leiter der Abteilung Technik. Damit war er verantwortlich für die Entwicklung des Hochspannungsnetzes im Bereich des Verbundnetzes Ost, d.h. für das Gebiet der Bezirke Dresden, Leipzig und Karl-Marx-Stadt.

H. Pundt zeichnet sich von Anbeginn durch Experimentierfreudigkeit aus. Er scheute keinen Aufwand, um insbesondere durch

Netzversuche reale Netzparameter zu ermitteln, die damals als Entscheidungsgrundlage für eine sichere Betriebsführung dienten.

Hervorzuheben sind die Mitwirkung an Kurzschlußversuchen und die selbständige Durchführung von Erdschlußversuchen in 110-kV-Netzen sowie in Mittelspannungsnetzen, deren wissenschaftliche Auswertung 1963 zur Dissertation „Untersuchungen der Ausgleichsvorgänge bei Erdschluß in Hochspannungsnetzen mit isoliertem Sternpunkt und induktiver Sternpunkterdung als Grundlage zur selektiven Erdschlußerfassung" an der Technischen Universität Dresden führte. Die Ausrüstung der 110-kV-Netze, die in der DDR mit Resonanzsternpunkterdung betrieben werden, mit dem von Prof. *Pundt* entwickelten Erdschlußrichtungsrelais TRER sowie die Einführung der niederohmigen Sternpunkterdung in Eigenbedarfsnetzen der Kraftwerke sind praktische Umsetzungen der in der Dissertation erarbeiteten Ergebnisse.

H. Pundt griff bereits während seiner Tätigkeit im Verbundnetz Ost neue Rechenverfahren für die Netzberechnung auf, so z.B. die symmetrischen Komponenten und die Matrizenrechnung für die Berechnung der Leistungsflüsse und der Kurzschlußströme in Elektroenergiesystemen und der Beeinflussung von Post- und Fernmeldeleitungen durch Hochspannungsleitungen. Die Berechnungen wurden damals noch auf der Bürorechenmaschine, Typ Sömmerda, ausgeführt. Die Tätigkeit im Verbundnetz Ost war durch umfangreiche Öffentlichkeitsarbeit gekennzeichnet. Neben den Vorträgen vor KDT-Fachgremien und Tagungen sowie Veröffentlichungen in der Fachpresse teilte *H. Pundt* sein Wissen der jüngeren Generation mit. 1956 bis 1963 war er nebenamtlich Dozent an der damaligen Ingenieurschule für Energiewirtschaft „Dr. Robert Mayer" in Zittau und hat 1960 bis 1962 die Lehrbriefreihe „Berechnung von Leitungen und Netzen" für das Fachschulstudium sowie das Kapitel 2, „Elektrische Berechnung der Freileitungen", für das Fachbuch von *Großpetsch*, „Starkstromfreileitungen", ausgearbeitet.

1963 begann *H. Pundt* seine Tätigkeit am Institut für elektrische Energieanlagen der Technischen Universität Dresden als wissenschaftlicher Mitarbeiter, um sich noch intensiver der wissenschaftlichen Arbeit und der Lehrtätigkeit zu widmen. Seit 1965 Hochschuldozent, verteidigte *H. Pundt* 1968 seine Habilitationsschrift „Probleme der Betriebssicherheit und Beeinflussung in Verbindung mit der Sternpunktbehandlung von Hochspannungsnetzen bis 110 kV" und wurde im gleichen Jahr zum Professor für Elektrotechnik (Netzplanung und Netzberechnung) berufen. Seit 1976 ist er Leiter des Wissenschaftsbereiches Elektroenergietechnik der Sektion Elektrotechnik an der TU Dresden.

Die stürmische Entwicklung der Rechentechnik vom ZRA 1 über die Entwicklung der Großrechner bis zum Einsatz der Büro- und Personalcomputer hat auch die Berechnung von Ausgleichsvorgängen im Elektroenergiesystem stimuliert und, was den Einsatz der technischen Mittel in Forschung und Lehre betrifft, stark beeinflußt. Unter Leitung von Prof. *Pundt* wurden Modelle entwickelt und Rechenprogramme erarbeitet, die es heute ermöglichen, neben den schon klassischen Aufgaben Lastfluß- und Kurzschlußstromberechnung, praktisch die Ausgleichsvorgänge im Elektroenergiesystem in allen Zeitbereichen unter Berücksichtigung des Verhaltens großer Turboblöcke und des Verhaltens der Abnehmer im Dialogbetrieb mit dem Computer zu berechnen. Praktische Anwendungen haben diese Arbeiten z.B. bei der Berechnung der dynamischen Stabilität für das Verbundnetz der DDR bei ausgewählten Fehlerorten und -arten, Berechnung der Wellenbeanspruchung großer Turboblöcke von Kernkraftwerken, der Verlauf des Kurzschlußstromes bei großen Turboblöcken, insbesondere bei untererregter Fahrweise (Ausbleiben von Nulldurchgängen) usw. gefunden.

In dem Buch „Berechnung und Analyse von Ausgleichsvorgängen in Elektroenergiesystemen" von Prof. *Pundt*, Doz. *Oswald* (TH Leipzig) und Dr. *Siegmund* (Komb. Kraftwerksanlagenbau) sind die Ergebnisse mehrjähriger Forschungen auf diesem Gebiet zusammengefaßt.

Prof. *Pundt* ist durch umfangreiche Forschungs-, Lehr- und Vortragstätigkeit im In- und Ausland, durch aktive Mitarbeit im ZAK Elektroenergie des Forschungsrates der DDR und in leitenden Funktionen der Kammer der Technik, u.a. als Vorsitzender der Bezirksfachsektion Elektrotechnik/Elektronik Dresden, Vorstandsmitglied der Zentralen Fachsektionen „Elektrische Energieanlagen" und „Elektroenergiesysteme", durch seine Mitarbeit in CIGRE, CIRED, PSCC usw. ein ausgewiesener, außerordentlich aktiver und geschätzter Hochschullehrer mit breitem Fachwissen auf dem Gebiet der Elektroenergetik. Staatliche und gesellschaftliche Auszeichnungen für ihn und das von ihm geleitete Kollektiv sind neben den Büchern, Zeitschriftenartikeln und Tagungsbeiträgen beredter Ausdruck dafür.

Seine Mitarbeiter, Schüler und Studenten wünschen Prof. *Pundt* anläßlich seines 60. Geburtstages weiterhin viel Gesundheit und Schaffenskraft, weitere Erfolge in der wissenschaftlichen Arbeit und im persönlichen Leben alles Gute.

Prof. Dr. sc. techn. *Ambrosch*, Dresden, Dr.-Ing. *Baumann*, Dresden EA 2954

Mathematische Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit von Leistungsschalterkombinationen bei Längs- und Querfehlern

H. Ambrosch, KDT; H. Bauer, KDT; Dresden

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *H. Pundt* zum 60. Geburtstag

Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

A	Teilsysteme Schalterabbild (Trennerabbild)
c	Korrekturfaktor
C	Teilsystem Auslösekreis und -spule
FV	Fehlverhalten (einer Schutzeinrichtung)
K	Teilsystem Kriterium für Schalterversagen
L	Teilsystem Leistungsschalter
n	Anzahl der Leistungsschalter, auf die zurückgegriffen wird
p	Intaktwahrscheinlichkeit (auch Wahrscheinlichkeit für Fehlverhalten in Tafel 1)
p_X	Intaktwahrscheinlichkeit des Teilsystems X
R	Teilsystem Rückgreifen
S	Teilsystem Schutz
S_{lin}	Linearform der Systemfunktion
S_{log}	Logische Systemfunktion (Strukturfunktion)
V	Verfügbarkeit des Teilsystems/Elements
V_S	Verfügbarkeit des Gesamtsystems

Fehlerereignisse im Elektroenergiesystem ergeben neben der Gefährdung durch Störlichtbogen, Schritt- und Berührungsspannungen meist auch unzulässig hohe Belastungen für die elektrotechnischen Betriebsmittel und Anlagen.
Die Dauer solcher Gefährdungen und Belastungen wird durch automatisch wirkende Schutzeinrichtungen wirksam begrenzt.
Die Schutzeinrichtungen bestehen aus den Teilsystemen: Meßwerterfassung (Stromwandler, Spannungswandler, eventuell Zwischenwandler, Analog-Digital-Umsetzer), der Meßwertverarbeitung (Schutzrelais, eventuell Mikrorechner mit Schutzalgorithmen), der Hilfsenergieversorgung (Batterie, Leitungen) und der Fehlerabschaltung (Auslösespule, Leistungsschalter).

1. Grundlagen und Probleme

Die hohen Anforderungen an die Versorgungszuverlässigkeit und die hohen Anlagenkosten im Hochspannungs-Übertragungsnetz erfordern Lösungen zur Beherrschung von Ausfällen auch innerhalb der Schutzsysteme. Üblich ist der Einsatz von Redundanz, deren Unabhängigkeit weitgehend zu sichern ist, bis hin zur Konzeption diversitärer Redundanz zur Vermeidung von Systemausfällen infolge systematischer Fehler.
Sekundärseitig unabhängige Redundanz wird bei den Meßwerterfassungssystemen mit unabhängigen Kernen für Stromwandler und mit getrennter Absicherung beim Spannungswandler weitgehend realisiert.
Infolge der Kompliziertheit und Empfindlichkeit der Meßwertverarbeitungssysteme wird hierbei häufig diversitäre Redundanz verwendet. Beispielsweise können für den Leitungsschutz Distanzschutz und Überstromzeitschutz verwendet werden, oder Distanzschutz unterschiedlicher Konstruktion, wenn ausschließlich durch dieses Schutzkriterium Fehlerortselektivität zu erreichen ist.
Die konsequente Weiterführung dieser Redundanzkonzeption führt sowohl zur üblichen Dopplung der Auslösespulen der Leistungsschalter als auch zur Reservierung der Leistungsschalterfunktion durch „Rückgreifen" auf vorgeordnete Leistungsschalter. Zur Vermeidung systematischer Fehlerursachen können die Auslösespulen unterschiedlich dimensioniert, beispielsweise für 220-V- oder für 60-V-Gleichspannung, und unterschiedlich beaufschlagt werden, beispielsweise von einer Batterie oder mit Hilfe einer Kondensatorentladung. Bei der Leistungsschalterreservierung kann die Wahrscheinlichkeit für systematische Fehler durch unterschiedliche Konstruktionen, unterschiedliche elektrische Belastungen (z.B. Hochspannungsleistungsschalter und Generator-Leistungsschalter) sowie verschiedenartige Umweltbelastungen (z.B. Freiluft- und Innenraumschalter) wesentlich reduziert werden.
Auf dieser Grundlage ist die durchgängige Redundanz für die Fehlerabschaltung erreichbar (Bild 1).
Dabei werden einige Problemstellungen sichtbar:

— Ist das Rückgreifen redundant auszuführen?
— Wie groß ist der Einfluß der Anzahl der Leistungsschalter beim Rückgreifen?
— Wie viele Rückgreifstufen sind notwendig?
— Welchen Einfluß hat der Verlust der Unabhängigkeit, z.B. für ein redundantes Rückgreifsystem?
— In welchem Teilsystem ist die Zuverlässigkeit zu erhöhen, um die Gesamtzuverlässigkeit maximal zu steigern?

2. Zuverlässigkeitsanforderungen

Wird vorausgesetzt, daß erst durch Zusammenwirken von Meßwerterfassung, Schutz, Auslösekreis einschließlich Hilfsenergieversorgung und Leistungsschalter eine Fehlerabschaltung möglich ist (Bild 1), können die Zuverlässigkeitsanforderungen prinzipiell durch Redundanz bei der Fehlerabschaltung berücksichtigt werden (Bild 2, Zeile 2). Bei der Realisierung dieses Grundprinzips muß zwischen Quer- und Längsfehlern unterschieden werden.
Beim Querfehler können unzulässige Belastungen durch den Kurzschlußstrom und die durch eine Fehlerabschaltung zu begrenzende Kurzschlußdauer entstehen. Bei Längsfehlern resultieren unzulässige Belastungen aus Unsymmetrien z.B. Erwärmungen in Generatoren durch Gegenströme, deren Wirkdauer mit Hilfe geeigneter Schutzautomatiken ebenfalls zu begrenzen ist. Außerdem ist zu unterscheiden, daß Querfehler im Normalfall durch einen Leistungsschalter abgeschaltet werden, während Längsfehler auch bei normalen Betriebsschaltungen oft an einem Schalter selbst entstehen, so daß bereits ein zweiter Schalter erforderlich ist, um den Fehlerstrom abzuschalten.
Hinzu kommt, daß beim Querfehler die normalen Schutzeinrichtungen der vorgeordneten Leistungsschalter in der Lage sind (Schalter in der Gegenstation und Schalter an der gleichen Sammelschiene, für die der Fehler im Rückwärtsschutzbereich liegt) den Fehler und demzufolge auch das Versagen des ersten Leistungsschalters (nicht differenziert vom Schutzversagen) zu erkennen. Somit ergibt sich für Querfehler eine einfache Möglichkeit von Redundanz bei der Fehlerabschaltung (Bild 2, Zeile 3), die als gestaffelter Distanzschutz seit langem üblich ist, aber den Nachteil einer Ausschaltzeitverlängerung für die Reserveabschaltung ergibt.
Für Längsfehler kann durch Auswahl eines geeigneten Kriteriums (z.B. Stromabfrage oder Schalterfunktion) erreicht werden, daß vom Schutz bei Vorliegen eines Schalterversagens auf die vorgelagerten Leistungsschalter zurückgegriffen wird (Bild 2, Zeilen 4 und 5).
Beim Rückgreifen in die Gegenstation (Schalter 2, Zeile 4, Spalte 4) wird eine Informationsübertragung in die Gegenstation erforderlich. Es ist anzustreben, daß durch zweckmäßigen Einsatz von Sammelschienenkupplungen die Anzahl der Leistungsschalter, auf die zurückgegriffen wird, begrenzt wird.
Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, daß außer dem Versagen der Fehlerabschaltung durch den betrachteten Leistungsschalter (Unterfunktion) auch eine Überfunktion möglich ist, d.h., daß die Leistungsschalter infolge eines Fehlverhaltens (FV 1. Art oder FV 2. Art) des Schutzes ausschalten. Dadurch ist zu erwarten, daß mit steigender Zuverlässigkeit gegenüber Leistungsschalterversagen (Bild 2, rechte Spalten) die Wahrscheinlichkeit von Fehlauslösungen größer wird. Obwohl bestimmte Fehlauslösungen durch die Auslegung des Übertragungsnetzes mindestens nach dem (n-1)-Kriterium tolerierbar sind, ist diese Wirkung zu berücksichtigen. Daraus folgt, daß Unzuverlässigkeiten in Teilsystemen primär innerhalb dieser Teilsysteme zu kompensieren sind und sekundäre Maßnahmen in banachbarten Teilsystemen überschaubar bleiben müssen. Insofern sind auch im Vergleich zum Gesamtsystem partiell höhere Redundanzkonzepte für Teilsysteme berechtigt, wie beispielsweise eine (1 aus 3)-Wirkung von drei Auslösesystemen eines Leistungsschalters oder eine (2 aus 3)-Übertragung von Signalen in die Gegenstation, wobei für die drei Teilsysteme vorteilhaft Diversität angestrebt wird.

Prof. Dr. sc. techn. *Helmut Ambrosch* ist ordentlicher Professor und Doz. Dr.-Ing. *Hartmut Bauer* ist ordentlicher Hochschuldozent an der Technischen Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik, Wissenschaftsbereich Elektroenergietechnik

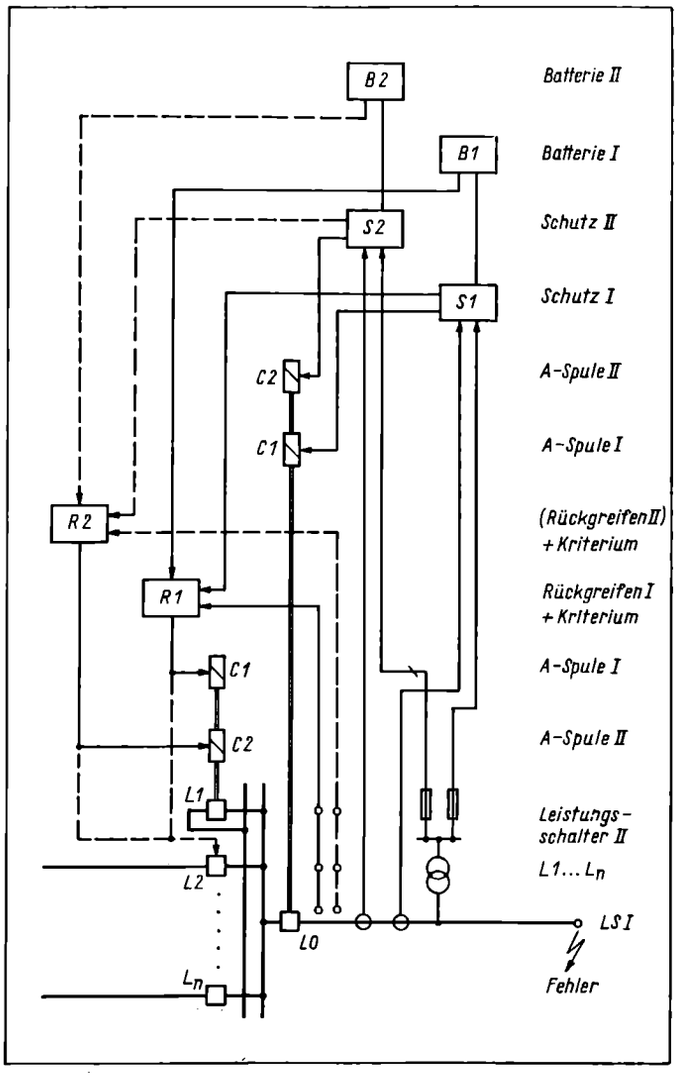


Bild 1. Durchgängig redundantes Schutzsystem für das Abschalten des Fehlers (Ausschalten der fehlerbehafteten Leitung)

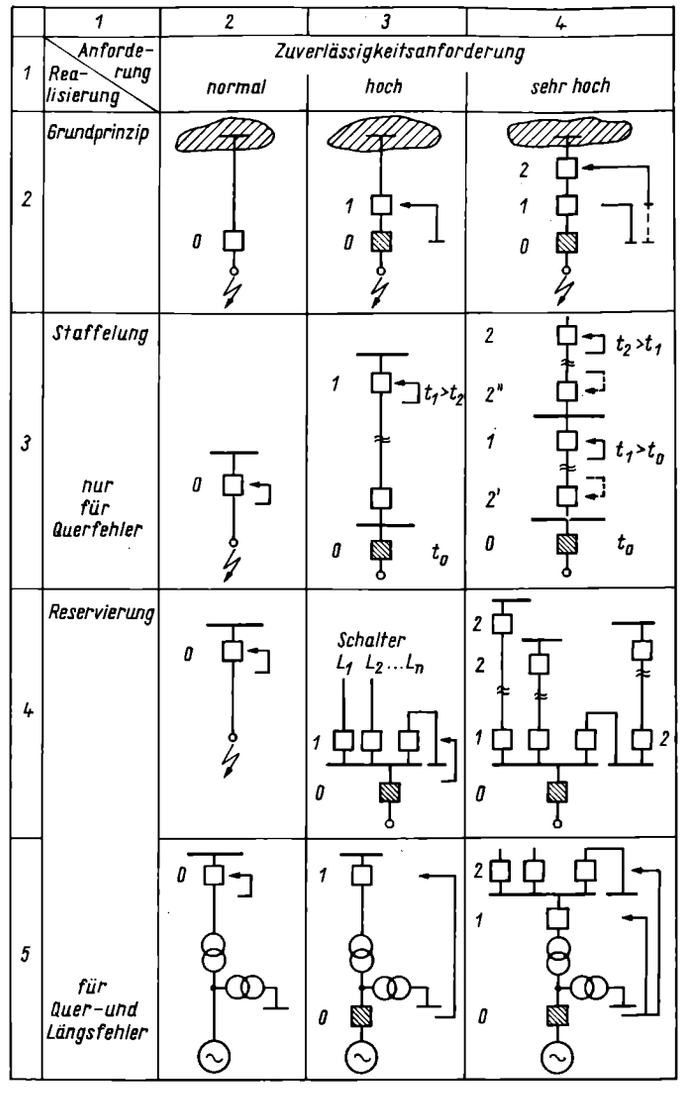


Bild 2. Grundprinzip der Fehlerabschaltung für verschiedene Zuverlässigkeitsanforderungen

Da eine qualitative Abschätzung der Wirkung eines Elements oder Teilsystems auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems oft nicht ausreicht, sind vergleichende Berechnungen erforderlich [1].

3. Modellbildung für die Zuverlässigkeitsberechnung

Werden nur die beiden Zustände „ausgefallen" und „nicht ausgefallen" für die Elemente und Systeme vorausgesetzt und gilt für das System die Monotonieeigenschaft, kann vorerst die Unabhängigkeit der Elemente angenommen werden, um vorteilhaft mit Booleschen Modellen rechnen zu können [2]. Das Boolesche Modell eines Systems kann dabei durch eine Zuverlässigkeitsersatzschaltung oder einen Systembau (Fehlerbaum, Funktionsbaum) strukturiert und mit Hilfe der Minimalweg- oder Minimalschnitt-Methode als logische Systemfunktion $S_{\log}$ (Strukturfunktion) auf der Grundlage der Booleschen Algebra beschrieben werden. Die daraus zu berechnende Linearform S_{lin} ist Grundlage für die Berechnung der Intaktwahrscheinlichkeit des Systems in Abhängigkeit von der Intaktwahrscheinlichkeit der Elemente.
Beispielsweise ergibt sich für eine einfache Redundanz (1 aus 2) für die Systemverfügbarkeit

$$V_S = V_1 + V_2 - V_1 V_2 \tag{1}$$

oder

$$V_S = 2V - V^2 \quad \text{für} \quad V_1 = V_2 = V. \tag{2}$$

Der Vergleich mit weiteren einfachen Grundstrukturen (Tafel 1) zeigt die Vorteile der (1 aus 2)-Schaltung bezüglich der Wirksamkeit der Fehlerabschaltung.
Um den Einfluß der Teilsysteme auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems (Bild 1) berechnen zu können, wird mit Hilfe einer Zuverlässigkeitsersatzschaltung (Bild 3) die logische Systemfunktion beschrieben:

$$S_{\log} = S_1 C_1 L_0 \vee S_2 C_2 L_0 \vee S_1 K_1 A_1 L_1 \cdots L_n \vee S_2 K_2 A_2 L_1 \cdots L_n. \tag{3}$$

Hierbei wurde für das Rückgreifen auf die n Leistungsschalter L_1 bis L_n das Ausfallverhalten der Auslösespulen in das Ausfallverhalten der Leistungsschalter einbezogen, da in der Systemfunktion stets das Produkt von C und L wirken würde [4].

Tafel 1. Verhalten von Grundstrukturen bezüglich Unterfunktion und Überfunktion

Struktur	Intaktwahrscheinlichkeit für Fehlerabschaltung: Werte		Wahrscheinlichkeit für Fehlverhalten: Werte
1	0,95	$p_S = p_1$	0,1
	0.9		0,05
1 aus 2	0,9975	$p_S = p_1 + p_2 - p_1 p_2$	0,19
	0,99	$p_S = 2p - p^2$	0,0975
2 aus 2	0,9025	$p_S = p_1 p_2$	0,01
	0,81	$p_S = p^2$	0,0025
1 aus 3	0,999875	$p_S = p_1 + p_2 + p_3 - p_1 p_2 - p_1 p_3 - p_2 p_3 + p_1 p_2 p_3$	0,271
	0,999	$p_S = 3p - 3p^2 + p^3$	0,143125
2 aus 3	0,99275	$p_S = p_1 p_2 + p_1 p_3 + p_2 p_3 - 2 p_1 p_2 p_3$	0,028
	0,972	$p_S = 3p^2 - 2p^3$	0,005625
3 aus 3	0,857375	$p_S = p_1 p_2 p_3$	0,001
	0,729	$p_S = p^3$	0,000625

Mit $K_v\ A_v = R_v$

und $L_1 = L_2 = \cdots = L_n = L$

wird

$$S_{\log} = S_1C_1L_0 \vee S_2C_2L_0 \vee S_1R_1L^n \vee S_2R_2L^n, \tag{4}$$

und man erhält über die Linearform

$$\begin{aligned} S_{\text{lin}} = {} & S_1C_1L_0 + S_2C_2L_0 + S_1R_1L^n + S_2R_2L^n \\ & - S_1S_2C_1C_2L_0 - S_1C_1R_1L_0L^n - S_1S_2C_1R_2L_0L^n \\ & - S_1S_2C_2R_1L_0L^n - S_2C_2R_2L_0L^n - S_1S_2R_1R_2L^n \\ & + S_1S_2C_1C_2R_1L_0L^n + S_1S_2C_1C_2R_2L_0L^n \\ & + S_1S_2C_1R_1R_2L_0L^n + S_1S_2C_2R_1R_2L_0L^n \\ & - S_1S_2C_1C_2R_1R_2L_0L^n \end{aligned} \tag{5}$$

unter der Voraussetzung, daß wie beim Rückgreifen die Zuverlässigkeit der Auslösespule in der Zuverlässigkeit des Leistungsschalters L_0 berücksichtigt wird, also p_{L0} anstatt $p_{C_v}p_{L0}$ verwendet wird, und mit den Annahmen

$$p_{X1} = p_{X2} = p_X \quad \text{sowie} \quad p_{L0} = c\,p_L \tag{6}$$

die Wahrscheinlichkeit für die Fehlerabschaltung

$$\begin{aligned} p = {} & (2 - p_S)\,cp_Sp_L + (2 - p_Sp_R)\,p_Sp_Rp_L^n \\ & - (2 - p_Sp_R)\,cp_Sp_Rp_L^{n+1}. \end{aligned} \tag{7}$$

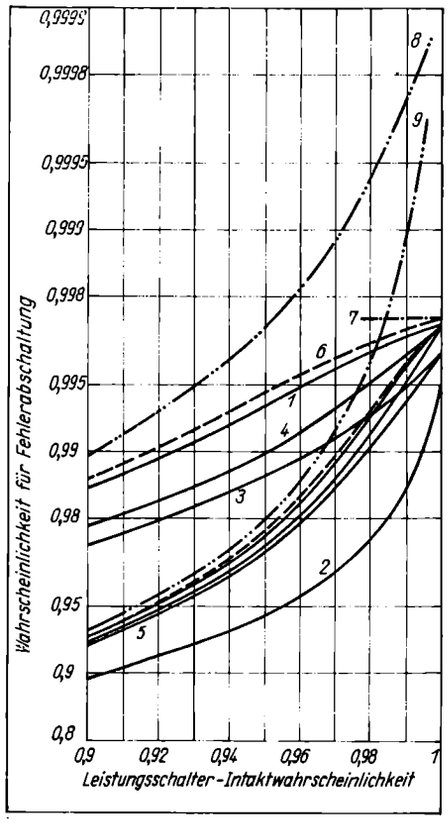


Bild 4. Zuverlässigkeit der Fehlerabschaltung in Abhängigkeit von der Intaktwahrscheinlichkeit der Leistungsschalter für verschiedene Zuverlässigkeiten von Schutz, Leistungsschalterspule und Rückgreifschutz. Parameter der Kurven in Tafel 2

Bild 3. Zuverlässigkeitsersatzschaltung zur Berechnung der Funktionszuverlässigkeit für die Fehlerabschaltung

Wird demgegenüber das Rückgreifen nicht redundant ausgeführt ($R_2 = 0$), erhält man als Wahrscheinlichkeit für die Fehlerabschaltung

$$p = (2 - p_S)\,cp_Sp_L + p_Sp_Rp_L^n - cp_Sp_Rp_L^{n+1}. \tag{8}$$

Für den Fall, daß bei redundantem Rückgreifen keine Unabhängigkeit gegeben ist ($R_1 \equiv R_2$), also systematische Fehleranteile zu erwarten sind, wird

$$\begin{aligned} p = {} & (2 - p_S)\,cp_Sp_L + (2 - p_S)\,p_Sp_Rp_L^n \\ & + (p_S - 2)\,cp_Sp_Rp_L^{n+1}. \end{aligned} \tag{9}$$

Für ein System ohne Rückgreifen gilt

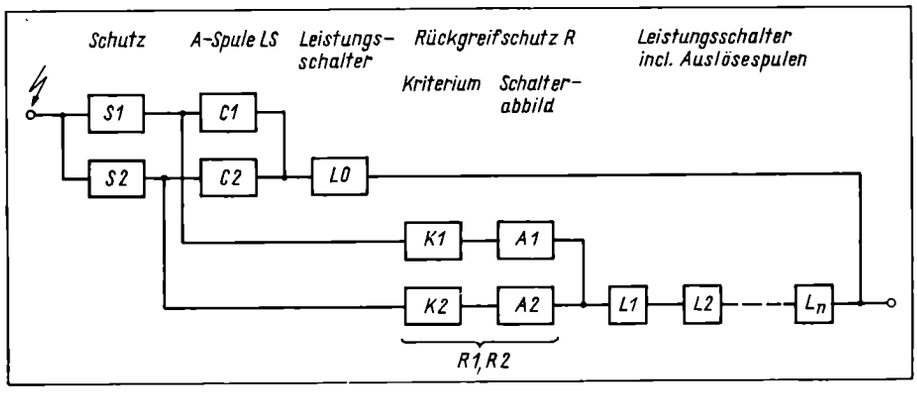
$$p = (2 - p_S)\,cp_Sp_L. \tag{10}$$

Durch den Faktor c können unterschiedliche Zuverlässigkeiten für den Leistungsschalter L_0 gegenüber den Leistungsschaltern L_1 bis L_n modelliert werden.

4. Beispiel

Für ein System zur Fehlerabschaltung (Bild 1) werden Intaktwahrscheinlichkeiten für die Schutz- und Rückgreifsysteme vorgegeben (Tafel 2), und mit Hilfe der Gln. (7) bis (10) können die Wahrscheinlichkeiten für die Fehlerabschaltung abhängig von der Leistungsschalter-Intaktwahrscheinlichkeit p_L (einschließlich Zuverlässigkeit der Auslösespulen) berechnet werden. Als Parameter wird die Anzahl n der Leistungsschalter, auf die zurückzugreifen ist, variiert.

Die Ergebnisse dieses Beispiels (Bild 4) zeigen, daß bei geringer Leistungsschalterzuverlässigkeit durch das Rückgreifen auf viele Leistungsschalter kein wesentlicher Effekt entsteht (Kurven 5 verglichen mit 2). Der Übergang vom einfachen (Kurve 3) auf ein redundantes (Kurve 1) Rückgreifen ist nur zweckmäßig, wenn auf wenige Leistungsschalter zurückgegriffen wird und wenn dabei systematische Fehleranteile (Kurve 4) ausgeschlossen werden. Grundsätzlich ist zu vermeiden, daß durch die Verbesserung des Rückgreifens die Unabhängigkeit des redundanten Schutzes gefährdet wird, da sonst als theoretischer Bestwert für das Gesamtsystem $p_{\max} \approx p_S = 0{,}95$ gilt, also eine wesentliche Verschlechterung des Gesamtsystems durch diese Nebenwirkung entsteht.



Tafel 2. Parameter der Kurven von Bild 4 (Zuverlässigkeitsersatzschaltung von Bild 3)

Kurve	Schutzsysteme	Korrekturfaktor	Rückgreifen	Leistungsschalter	Bemerkungen
1	$p_{S1} = p_{S2} = 0{,}95$ unabhängig	$c = 0{,}98$ ($p_{L0} = 0{,}98\,p_L$)	$p_{R1} = p_{R2} = 0{,}9$ unabhängig	L_0, L_1	vollständig redundantes Schutz- und Rückgreifsystem
2			$p_{R1} = p_{R2} = 0$		redundantes Schutzsystem ohne Rückgreifen
3			$p_{R1} = 0{,}9;\ p_{R2} = 0$		redundantes Schutzsystem mit einfachem Rückgreifen
4			$p_{R1} = p_{R2} = 0{,}9$ abhängig		wie 1, aber mit systematischen Fehlern im redundanten Rückgreifsystem
5			wie 1, 3, 4	$L_0, L_1 \cdots L_{10}$	Rückgreifen auf 10 Leistungsschalter
6		$c = 1$ ($p_{L0} = p_L$)	$p_{R1} = p_{R2} = 0{,}05$ unabhängig	L_0, L_1	wie 1, mit zuverlässigeren Rückgreifsystemen
7			beliebig	$p_{L0} = 1$	erreichbarer Maximalwert bei vorgegebenem Schutz
8	$p_{S1} = p_{S2} = 0{,}90$ unabhängig		$p_{R1} = p_{R2} = 0{,}95$ unabhängig	L_0, L_1	wie 6, mit zuverlässigeren Schutzsystemen
9				$L_0, L_1 \cdots L_{10}$	

Eine Verbesserung des Rückgreifens (Kurve 6) bringt keinen wesentlichen Beitrag (Vergleich mit Kurve 1), da der Bestwert des Systems (Grenzkurve 7) von der Zuverlässigkeit des Schutzes bestimmt wird. Dessen Verbesserung kann einen wesentlichen Effekt (Kurve 8) bringen, der jedoch beim Rückgreifen auf zu viele Leistungsschalter stark reduziert werden kann (Kurve 9).
Auf der Grundlage des beschriebenen Modells lassen sich derartige Berechnungen mit beliebigen anderen Zuverlässigkeitswerten durchführen. Beispielsweise wurden 1981 von der CIGRE Ausfallraten von 420-kV-Leistungsschaltern für schwere Fehler zwischen 2 und 8%/a genannt, als Mittelwert 4,2%/a [3]. Als Bestwerte werden gegenwärtig von Schaltgeräteherstellern Werte von 0,5%/a und darunter angegeben. Sind dabei die betreffenden Werte der Störungs- und Schadensstatistik auf die Fehlerabschaltung bezogen, können sie unmittelbar in die Berechnung einbezogen werden. Anderenfalls sind die Werte gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Wartungsstrategie, des Ausfallmechanismus, des Prüfturnus usw. umzurechnen.

5. Schlußfolgerungen

Aus dem beschriebenen Modell und aus den berechneten Ergebnissen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ableiten:

a) Zur Entscheidungsvorbereitung können Zuverlässigkeitsmodelle und quantitative Vergleichsrechnungen genutzt werden.
b) In die Untersuchungen sind Quer- und Längsfehler einzubeziehen.
c) Obwohl Fehlauslösungen (Überfunktionen) durch die Auslegung der Netze nach dem $(n-1)$-Kriterium toleriert werden können, sollten diese Nebenwirkungen auch durch Begrenzung des Rückgreifraumes überschaubar bleiben.
d) Partielle Unzuverlässigkeiten sollten unmittelbar in dem betreffenden Teilsystem kompensiert werden, da Maßnahmen in den benachbarten Teilsystemen oft höhere Aufwendungen erfordern, aber geringere beabsichtigte Wirkungen und zusätzliche unbeabsichtigte (negative) Nebenwirkungen ergeben.
e) Der Übergang auf eine höhere Stufe der Redundanz in einem Teilsystem (z.B. Rückgreifen) darf keine Rückwirkung auf die Unabhängigkeit anderer redundanter Teilsysteme (z.B. Schutz I und II) ergeben. Ein Verlust dieser Unabhängigkeit ergibt meist eine wesentliche größere Verschlechterung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems im Vergleich zur Verbesserung, die durch die betreffende Maßnahme angestrebt wurde.
f) Zur Vermeidung von Abhängigkeiten (Anteile von systematischen Ausfällen) zwischen redundanten Teilsystemen ist diversitäre Redundanz anzustreben, beispielsweise
   — unterschiedliche Prinzipien für den Schutz
   — unterschiedliche Kriterien für das Rückgreifen
   — unterschiedliche Auslösesysteme für die Auslösespulen
   — unterschiedliche elektrische Belastungen
   — unterschiedliche Konstruktionen und
   — unterschiedliche Umweltbelastungen für Leistungsschalter.
g) Überlegungen über weitere Rückgreifstufen sind mit den Zuverlässigkeiten der übrigen Teilsysteme zu koordinieren.

Literatur

[1] *Ambrosch, H.; Bauer, H.:* Bewertung der nachträglichen Installation eines zusätzlichen Leistungsschalters und der Zuverlässigkeit beim Rückgreifen. Bericht 703/1987, Technische Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik, Wissenschaftsbereich Elektroenergietechnik

[2] *Reinschke, K.; Ušakov, I. A.:* Zuverlässigkeitsstrukturen. Berlin: VEB Verlag Technik 1987

[3] *Mazza, G.; Michawa, R.; Slamecka, E.:* The first international enquiry on circuit-breaker failures and defeets in service. ELEKTRA (1981) 79, S. 21–91

[4] *Bauer, H.; Ambrosch, H.:* Zuverlässigkeitsmodell und Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit von Leistungsschalterkombinationen bei Längs- und Querfehlern. Bericht 754/88, Technische Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik, Wissenschaftsbereich Elektroenergietechnik

EA 5985

Zeitskalierte Modellierung des Elektroenergiesystems[1)]

B. Oswald, KDT, Leipzig

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *H. Pundt* zum 60. Geburtstag

1. Übersicht

Bei der Berechnung von Ausgleichsvorgängen in Elektroenergiesystemen stößt man sehr schnell auf zwei grundlegende Probleme:

1. die hohe Ordnung n des zu lösenden Zustandsdifferentialgleichungssystems
2. den steifen Charakter des Zustandsdifferentialgleichungssystems.

Ein Differentialgleichungssystem heißt steif, wenn sein Eigenspektrum $\lambda(A) = \{|\lambda|_{\min} \ll |\lambda|_{\max}\}$ Eigenwerte mit stark unterschiedlicher Größenordnung aufweist. Als Maß für die Steifheit dient der Steifheitsquotient $q = \frac{|\lambda|_{\max}}{|\lambda|_{\min}}$, wobei man für $q > 10^2$ von steifen Systemen spricht [1]. Das Problem der Steifheit liegt darin, daß die mit den großen Eigenwerten verbundenen schnellen Lösungsanteile (Eigenbewegungen) zu einem kleinen Integrationsschritt zwingen, und die mit den kleinen Eigenwerten korrespondierenden langsamen Lösungsanteile die Untersuchungen eines großen Zeitbereichs erfordern. Da es aussichtslos ist, den gesamten Zeitbereich mit den schnellen Lösungsanteilen angepaßten Integrationsschritt zu untersuchen, wie es die expliziten Integrationsverfahren verlangen, bleiben nur zwei Auswege (Bild 1):

1. Anwendung impliziter Integrationsverfahren mit Schrittweiten- und Ordnungssteuerung oder
2. Beschränkung auf bestimmte Vorgänge (Eigenbewegungen) in bestimmten Zeitbereichen, kurz Teilsystembildung genannt.

Von beiden Strategien wird ein hoher Rechenzeitgewinn erwartet.

Am WB Elektroenergietechnik der TU Dresden wurde in den letzten Jahren ausführlich der den praktischen Belangen besser entsprechende Weg der systematischen Teilsystembildung und der damit verbundenen Ordnungsreduzierung der Modelle verfolgt und erfolgreich angewendet. Er hat zur zweckmäßigen Klassifizierung der Ausgleichsvorgänge in elektromagnetische, elektromagnetomechanische und elektromechanische Vorgänge als Grundlage für die begründete Bildung aufwandsreduzierter Modelle niedriger Ordnung geführt [2], die auch in Computerprogramme (EMMA, EMIL, KURT, PC-EMMA, NEDYN, PC-KURT, . . .) umgesetzt sind [3] bis [6].
Besondere Impulse für die Teilsystembildung gingen in der letzten Zeit von der Anwendung der „singular perturbation method" als Bestandteil der Methode der „time-scale modelling" auf das Elektroenergiesystem aus [7] [8]. Die Methoden der Modellreduktion im Zeitbereich sind auch auf nichtlineare Systeme anwendbar und kommen durch ihre hohe Anschaulichkeit dem ingenieurtechnischen Denken entgegen; sie werden deshalb gegenüber den modalen Verfahren bevorzugt. Der erste praktische Anwendungsfall war die getrennte Berechnung der Gleich- und Wechselanteile zur Bewältigung des sonst zu hohen Aufwandes bei der Berechnung der Kurzschlußstromverläufe als Grundlage für das Programm KURT [9] (Bild 2). Inzwischen haben die theoretischen Arbeiten und die praktischen Anwendungen auf dem Gebiet der „time-scale modelling" oder kurz der zeitskalierten Modellierung einen solchen Stand erreicht, daß sie das Fundament der effektiven Computersimulation von Ausgleichsvorgängen auch in großen Elektroenergiesystemen bilden. Über wesentliche Ergebnisse berichten erstmals die Arbeiten [9] bis [12].
Allen bisherigen Veröffentlichungen liegen aber a priori Vereinfachungen bei der Teilsystembildung zugrunde, d.h., es wird nie von vollständigen Systemen mit der ganzen Breite der möglichen

Dozent Dr. sc. techn. *Bernd Oswald* ist stellv. Sektionsdirektor für Forschung an der Sektion Elektroenergieanlagen der Technischen Hochschule Leipzig

[1)] Der Verfasser widmet den Beitrag Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *H. Pundt* zu seinem 60. Geburtstag in Dankbarkeit für die langjährige harmonische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Berechnung von Ausgleichsvorgängen in Elektroenergiesystemen.
Bis zu seiner Berufung an die TH Leipzig war der Verfasser Bereichsoberassistent bei Prof. *Pundt* und bearbeitete zuletzt das hier vorgestellte Gebiet der zeitskalierten Modellierung.

Bild 1. Übersicht zu den Lösungsmethoden für die Zustandsdifferentialgleichung mit Hervorhebung der Strategie für das Elektroenergiesystem

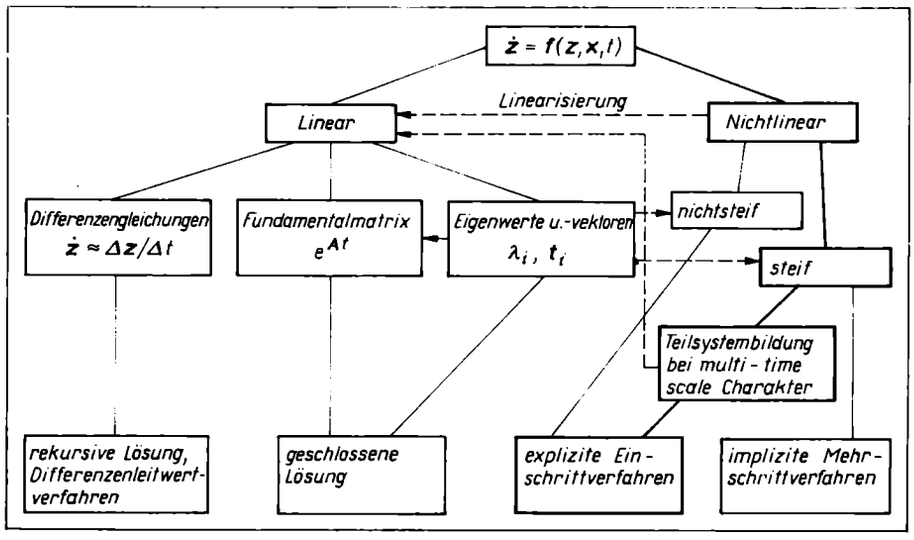
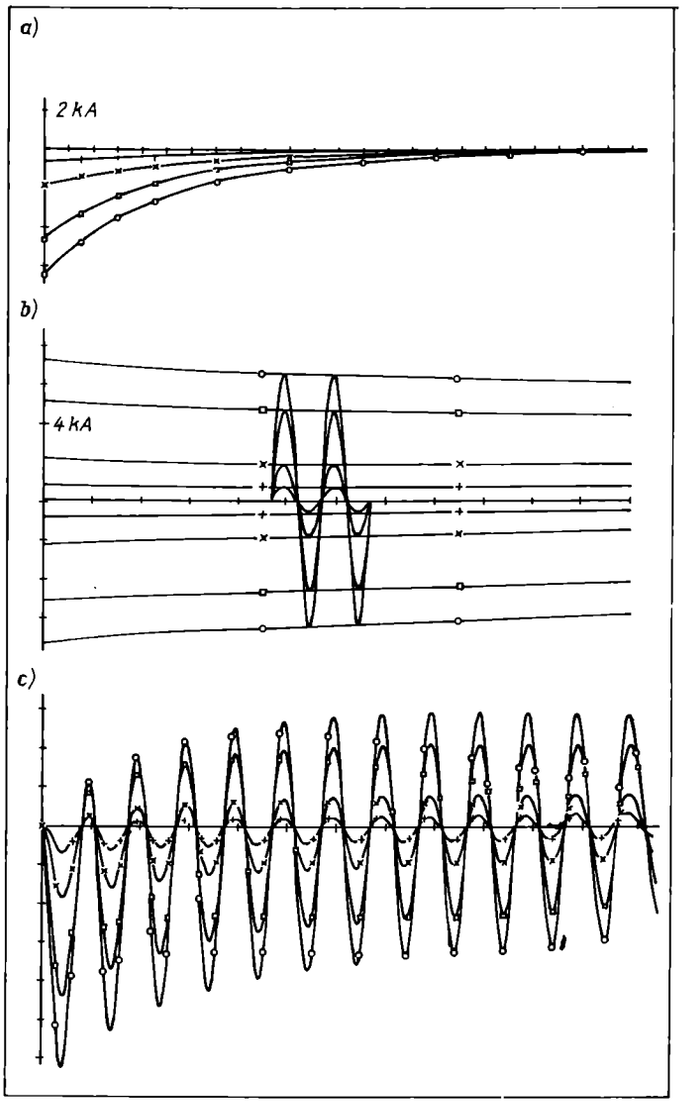


Bild 2. Kurzschlußstromberechnung
a) Gleichanteile; b) Wechselanteile; c) Überlagerung zum vollständigen Verlauf



Eigenbewegungen ausgegangen. Entweder werden die langsamen mechanischen Bewegungsvorgänge nicht mitgenommen [11], oder es werden die schnellsten Umladevorgänge durch Weglassen der Netzkapazitäten unterdrückt [4], oder das Problem wird unzulässig in den d, q-Koordinaten einer betrachteten Maschine behandelt, wodurch sogar eine falsche Aussage zum Drehzahleinfluß auf das quasistationäre Teilsystem entsteht [13]. In der vorliegenden Arbeit soll deshalb das Ergebnis der Teilsystembildung an einem vollständigen, repräsentativen Beispiel, dessen Kompetenz nachgewiesen wird, dargestellt und mit dem Verhalten des Originalsystems verglichen werden, wobei für die Referenzlösung des Originalsystems nicht die Mühe der sehr zeitaufwendigen ausführlichen Lösung (etwa 6 h Rechenzeit auf einem 16-bit-PC) gescheut wurde. Da die 2. Teilsystembildung (weitere Zerlegung des bei der 1. Teilsystembildung erhaltenen dynamischen Teilsysteme) unproblematisch ist und in [10] [11] [12] ausführlich beschrieben wurde, wird sie an dieser Stelle nicht mehr erörtert. Auch wird auf die Wiedergabe der inzwischen hinlänglich beschriebenen mathematischen Vorgehensweise der Teilsystembildung verzichtet. Es werden nur noch kurz die dynamischen Eigenschaften des Elektroenergiesystems und der Teilsysteme, soweit sie für die Interpretation der Ergebnisse erforderlich sind, beschrieben.

2. Dynamische Eigenschaften des Elektroenergiesystems

Zur Untersuchung der dynamischen Eigenschaften und der Teilsysteme des EES genügt, wie noch begründet wird, das einfache Beispiel im Bild 3. In mit ω_0 rotierenden Synchron- oder Netzkoordinaten ist das Zustandsdifferentialgleichungssystem mit

$$\mathbf{z} = [u_{1d0}\, u_{1q0}\, \omega_0\psi_{1d0}\, \omega_0\psi_{1q0}\, \omega_0\psi_{2d0}\, \omega_0\psi_{2q0}\, \omega_0\psi_f\, \omega_0\psi_D\, \omega_0\psi_Q\, s\, \delta_p{}^T], \quad (1)$$

u_{1d0}, u_{1q0}	Netzkoordinaten-Komponenten der Spannung über der Leitungskapazität
ψ_{1d0}, ψ_{1q0} ψ_{2d0}, ψ_{2q0}	Netzkoordinaten-Komponenten der beiden Maschenflußverkettungen nach Bild 3
ψ_f, ψ_D, ψ_Q	Flußverkettungen der Erreger-, Dämpferlängs- und Dämpferquerachsenwicklung jeweils multipliziert mit dem zugehörigen Koppelfaktor k_f, k_D und k_Q
ω_0	Eigenkreisfrequenz
s	Schlupf
δ_p	Polradwinkel in rad,

als Zustandsvariablen zeitinvariant und unabhängig vom Schlupf s und nimmt die für die 1. Teilsystembildung zweckmäßige „explizit singular pertubation form" an. Die Eigenwerte der um den Nennarbeitspunkt linearisierten Systemmatrix A sind bezogen auf ω_0:

„groß"	$\lambda_{1,2}$	$= -0{,}227 \pm \mathrm{j}\ 29{,}491$
	$\lambda_{3,4}$	$= -0{,}228 \pm \mathrm{j}\ 27{,}480$
		← (2. TS-Bildung)
„mittel"	$\lambda_{5,6}$	$= -0{,}138 \pm \mathrm{j}\ 0{,}999$
		← (1. TS-Bildung)
„klein"	λ_7	$= -0{,}0264$
	λ_8	$= -0{,}00125$
	λ_9	$= -0{,}0984$
	$\lambda_{10,11}$	$= -0{,}0251 \pm \mathrm{j}\ 0{,}0251.$

Sie bilden ein Eigenspektrum, das sich entsprechend der Größenordnung der Beträge in drei Gruppen einteilen läßt. Man spricht dann von einem Three-time-scale-Charakter. Er ist, zu mindest global (weitere Unterteilungen sind möglich), typisch für das dynamische Verhalten des Elektroenergiesystems und physikalisch durch die unterschiedlichen Energiespeicherkapazitäten der Betriebsmittel begründet [12]. Zu jeder der drei Gruppen von Eigenwerten

gehören charakteristische Eigenbewegungen, so daß das Energiesystem prinzipiell schnelle, mittlere und langsame Größenänderungen hervorbringt.

Diesen Größenänderungen wiederum lassen sich drei Zeitbereiche, sinnvoll als Kurz-, Mittel- und Langzeitbereiche bezeichnet, zuordnen, in denen sie dominant ausgeprägt sind. Da sich die Beträge der Eigenwerte in den drei Gruppen genügend unterscheiden, sind die theoretischen Bedingungen für die Bildung von drei Teilsystemen entsprechend Bild 4 gegeben. Es interessieren eigentlich nur noch die erzielbare Genauigkeit und der Effektivitätsgewinn bei der Beschränkung auf Teilsysteme (ordnungsreduzierte Modelle) sowie der Grad der Verallgemeinerung. Zur Verallgemeinerung lassen sich folgende logische Schlüsse ziehen:

— Wenn das Beispielnetz allgemeingültigen Charakter haben soll, muß bei Hinzunahme weiterer Betriebsmittel (Ausdehnung zum EES) der Abstand zwischen den Eigenwertgruppen, d.h. der Three-time-scale-Charakter, gewahrt bleiben.

— Durch die Hinzunahme weiterer Generatoren (Motoren) wächst zunächst die Anzahl der Eigenwerte in der Gruppe der kleinen Eigenwerte. Und da mindestens eine neue Masche entsteht, kommt auch mindestens eine neue Gleichstromzeitkonstante hinzu, und es verändern sich die schnellen Eigenwerte. Da die Größenordnung der mittleren Eigenwerte (deren negativer Reziprokwert die Gleichstromzeitkonstanten sind) vom Betrag ω_0 des Imaginärteils bestimmt wird, ist nicht mit dem Aufkommen einer anderen Größenordnung durch das Hinzukommen weiterer Gleichstromzeitkonstanten zu rechnen. Auf die großen Eigenwerte wirkt sich eine hinzukommende induktive Masche vergrößernd (die Eigenfrequenz wächst) aus, so daß hier lediglich eine Verschiebung der Größenordnung in der großen Eigenwertgruppe in zulässiger Richtung erfolgt.

— Ähnlich läßt sich der Einfluß hinzukommender Leitungen abschätzen. Eine feinere Leitungsdarstellung durch eine Kettenschaltung von LC-Gliedern oder die Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Leitungsparameter durch zusätzliche RL-Korrekturglieder wirkt sich nur geringfügig auf die durch die T-Schaltung gut erfaßte 1. Eigenfrequenz aus und bringt sonst nur zusätzliche, noch größere Eigenfrequenzen in die Gruppe der großen Eigenwerte ein.

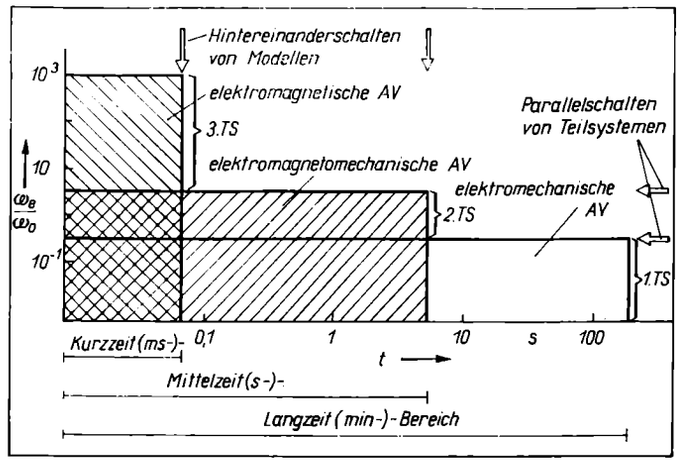


Bild 5. Einteilung der Ausgleichsvorgänge (AV) nach Änderungsfrequenz und Zeitbereich und Zuordnung der Teilsysteme

Es kann also davon ausgegangen werden, daß das im Bild 3 dargestellte Beispielnetz das EES hinsichtlich des prinzipiellen Three-time-scale-Charakters vollständig repräsentiert (im Gegensatz zu vielen anderen Aufgabenstellungen, bei denen eine Beschränkung auf das Einmaschinenproblem unzulässig ist).

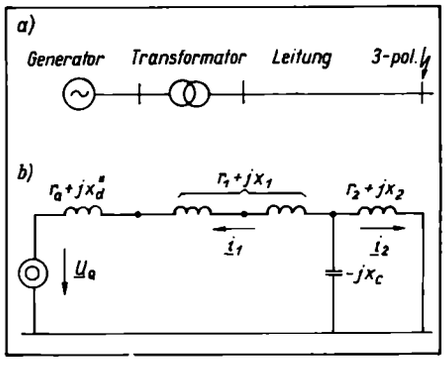


Bild 3
Beispiele zur Darstellung der dynamischen Eigenschaften des Elektroenergiesystems
a) Schaltbild; b) Raumzeigerersatzschaltung
Parameter in p.u.:
$r_a = 0{,}005$; $x = 0{,}16$;
$x_d = 1{,}63 = x_q$;
$x'_d = 0{,}28$; $x''_d = 0{,}20$;
$x''_q = 0{,}26$; $T'_d = 0{,}8$ s;
$T''_d = 0{,}1$ s;
$T''_q = 0{,}15$ s; $T_m = 10$ s
Transformator:
$r_{ps} = 0{,}006$; $x_{ps} = 0{,}12$;
Leitung: $r = 0{,}05$;
$x_b = 0{,}1$; $x_C = 36$
i_{1d0}, i_{1q0}
i_{2d0}, i_{2q0}
Netzkoordinaten-Komponenten der beiden Maschenströme

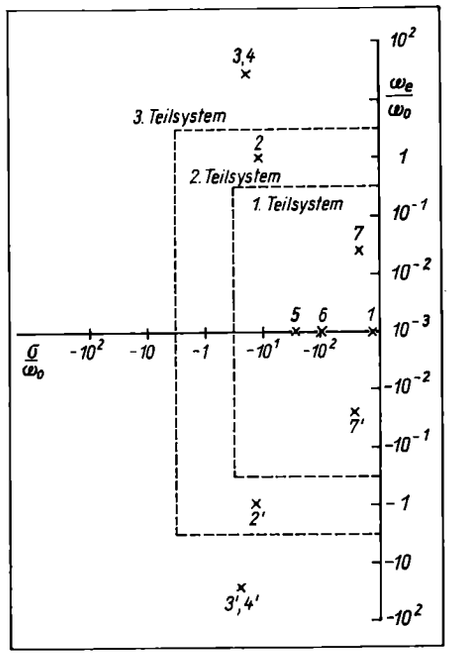


Bild 4
Eigenspektrum und Zuordnung von repräsentativen Teilsystemen für das Netz aus Bild 3

3. Anwendung der zeitskalierten Modelle

Die mit Hilfe der „singular perturbation method" gewonnenen Teilsysteme sind Teilsysteme für bestimmte Zeitbereiche. Bei der 1. Teilsystembildung entstehen das quasistationäre Teilsystem (QST) und ein dynamisches Teilsystem, das im 2. Schritt weiter in zwei Teilsysteme zerlegt wird, von denen das langsame endgültig als mittleres Teilsystem und das schnelle als schnelles Teilsystem bezeichnet wird. Das quasistationäre Teilsystem ist bekanntlich repräsentativ für die im Vergleich zu ω_0 langsamen elektromechanischen Schwingungsvorgänge (Stabilität, Reglerschwingungen, Selbsterregung, Torsionsschwingungen, subsynchrone Resonanz), während das mittlere oder 2. Teilsystem die Gleichglieder der Ströme (negative reelle Eigenwerte) und das schnelle oder 3. Teilsystem (konjugiert komplexe Eigenwerte) die höherfrequenten Umladevorgänge, wie sie bei Erdfehlern und Schaltvorgängen auftreten, nachbilden. Die entsprechenden Zeitbereiche ergeben sich aus der Zuordnung der Kurz-, Mittel- und Langzeitbereiche zu den Teilsystemen (Bild 5).

Aufgrund der Größenunterschiede der Eigenwerte (Eigenfrequenzen) sind zur Untersuchung der einzelnen Zeitbereiche etwa die gleiche Anzahl von Zeitschritten erforderlich. Bei der Aufwandsgegenüberstellung ist noch zu beachten, daß mit abnehmender Frequenz zwar die Modelle der einzelnen Betriebsmittel einfacher werden, die Vorgänge sich aber auf mehr Betriebsmittel im Netz ausdehnen. So ist der rechentechnische Aufwand für die Lösung der Teilsysteme auch aus der Sicht des Bilanzraumes gleichermaßen ausgewogen und angepaßt.

Anhand von Bild 5 wird auch der grundlegende Unterschied der Bewältigung des rechentechnischen Aufwandes durch die Teilsystembildung gegenüber der prinzipiell auch möglichen Vorgehensweise, Modelle unterschiedlicher Ordnung „hintereinander zu schalten", d.h. nach Abklingen der schnellen Komponenten auf Modelle geringerer Ordnung überzugehen und so effektiv bis in den Langzeitbereich zu gelangen, deutlich [14].

In den seltensten Fällen interessiert man sich nämlich für die vollständigen zeitlichen Verläufe, wie sie die Methode der Hintereinanderschaltung von Modellen oder die Überlagerung der parallel gelösten Teilsysteme liefert (Beispiel transiente Stabilität oder Ermittlung der charakteristischen Kurzschlußgrößen aus dem Kurzschlußstromverlauf). Durch die parallele Organisation der Teilsystembildung ist es leicht möglich, ein Teilsystem völlig wegzulassen (z.B. das für die höherfrequenten Anteile oder das für die mechanischen Bewegungsvorgänge) und nur die unmittelbar interessierenden Lösungsanteile im relevanten Zeitbereich aufgaben-

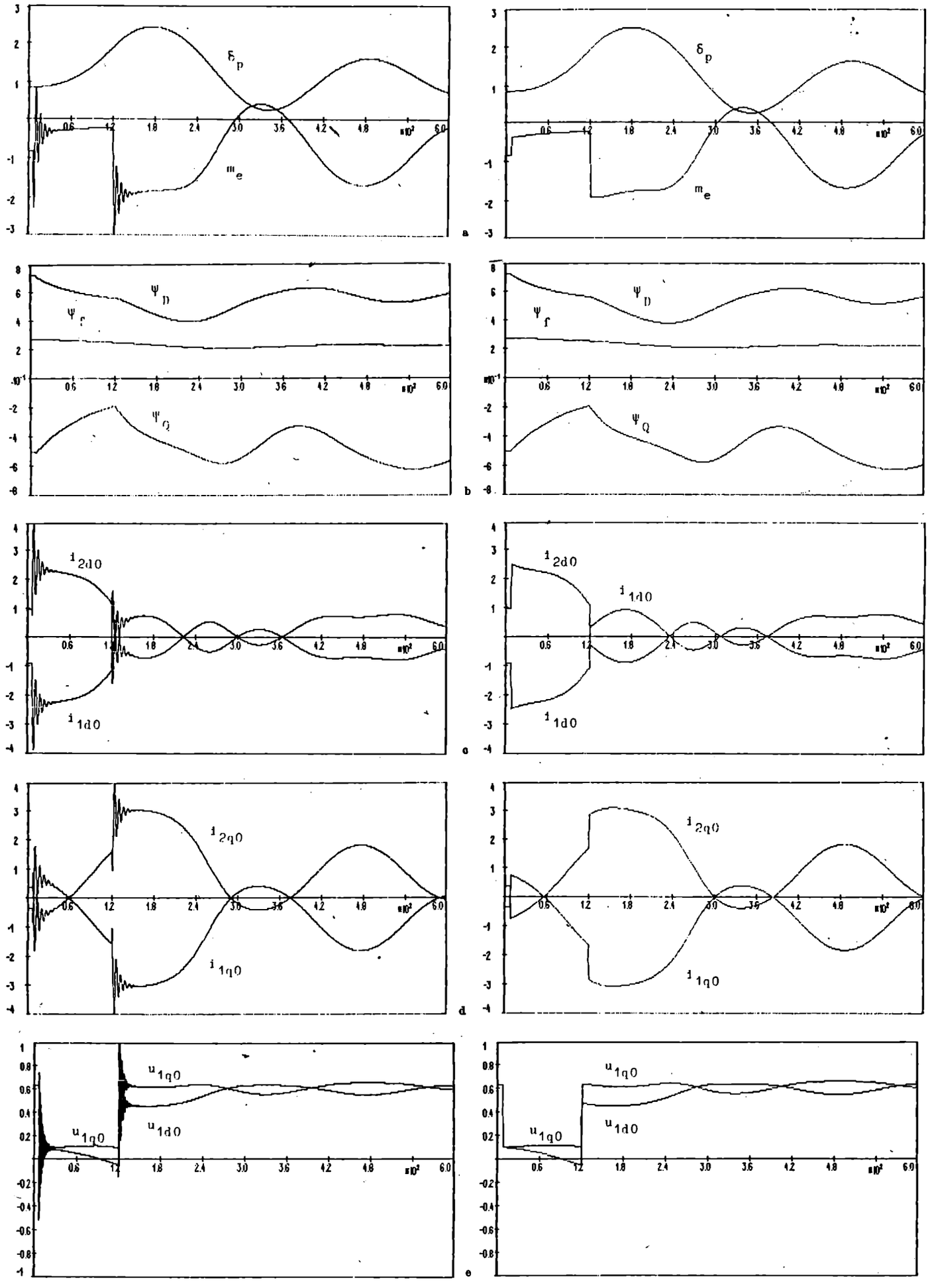


Bild 6. Vergleich der exakten Lösung (linke Spalte) mit der für das quasistationäre Teilsystem (rechte Spalte) für das Beispiel aus Bild 3

a) Polradwinkel und Luftspaltdrehmoment; b) Läuferflußverkettungen; c) Stromkomponenten i_{1d0} und i_{2d0}; d) Stromkomponenten i_{2d0} und i_{2q0}; e) Spannungskomponenten u_{1d0} und u_{1q0}

orientiert bereitzustellen. Auf diese Weise ist die höchste Effektivität zu erzielen.

Die vollständigen Größenverläufe für das Beispiel im Bild 3 mit dreipoligem Kurzschluß von $T = \omega_0 t = 113{,}7$ Dauer bestätigen zum einen den Three-time-scale-Charakter durch die Ausbildung von drei unterschiedlich schnellen Anteilen[2]) in den Größenverläufen und zeigen zum anderen, daß sie nicht gleichermaßen in allen Größen ausgeprägt sind (Bild 6). Die Komponenten der Maschenströme enthalten deutlich alle drei Anteile, während die der Spannung über der Leitungskapazität nur den langsamen und schnellen Anteil (was durch die 2. Teilsystembildung bewiesen wird) und die Läufergrößen δ_p, s, ψ_f, ψ_D und ψ_Q nur den langsamen Anteil sichtbar aufweisen. Bis auf das Fehlen des mittleren Anteils in den Spannungskomponenten kann dieses Lösungsbild bereits anhand der Expliziten-singular-perturbation-Form der Zustandsdifferentialgleichung und dem Zusammenhang zwischen den Maschenströmen mit den als Zustandsvariablen fungierenden Maschenflußverkettungen vorhergesagt werden. Trotz der guten Übereinstimmung der Eigenwerte der Teilsysteme mit denen des Originalsystems, können sich nach der 1. Teilsystembildung Abweichungen in den Größenverläufen ergeben. Sie entstehen durch den im quasistationären Teilsystem nicht berücksichtigten 50-Hz-Anteil im Luftspaltdrehmoment (in die Literatur als „back swing effect" eingegangen), ohne den es zu einem verfälschten Polradwinkelverlauf, der sich folgerichtig auf die Mittelwerte aller elektrischen Größen überträgt, kommt. Der Eigenwertvergleich kann diesen Fehler nicht ausweisen, da er auf einer Linearisierung der Systemmatrix beruht. Ohne Berücksichtigung der Bewegungsgleichung und bei konstanten Parametern ist das Zustandsdifferentialgleichungssystem linear und auch die 1. Teilsystembildung mit nahezu keinem Fehler verbunden [11].

Ziel der nächsten Arbeiten muß es sein, das quasistationäre Teilsystem durch entsprechende Korrekturen hinsichtlich seiner Treffsicherheit zu verbessern. Das ist insbesondere für die Untersuchung der transienten Stabilität von Synchronmotoren mit dem quasistationären Teilsystem, bei denen der Fehler am größten wird und auf der unsicheren Seite liegt, erforderlich [15]. Abschließend sei noch erwähnt, daß sich bei der Berechnung der ausführlichen und genäherten Lösungen im Bild 6 die Rechenzeiten wie 100:1 verhalten.

Literatur

[1] *Maeß, G.:* Vorlesungen über numerische Mathematik II. Berlin: Akademie Verlag 1988

[2] *Oswald, B.:* Zustandsdarstellung des Elektroenergiesystems zur Berechnung von elektromagnetomechanischen Ausgleichsvorgängen. Dissertation B. TU Dresden 1981

[3] *Pundt, H.:* Berechnung von Ausgleichsvorgängen in Elektroenergiesystemen. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 9, S. 451–452

[4] *Erlich, I.:* Modellierung des Elektroenergiesystems in der Zustandsform zur Simulation elektromechanischer Ausgleichsvorgänge. Dissertation A. TU Dresden 1984

[5] *Fuchs, R.:* Digitale Berechnung und Auswertung von Kurzschlußstromverläufen in Elektroenergiesystemen. Dissertation A. TU Dresden 1984

[6] *Lau, B.:* Berechnung elektromagnetischer und elektromagnetomechanischer Ausgleichsvorgänge im Elektroenergiesystem. Dissertation A. TU Dresden 1988

[7] *Chow, J. H.:* Time-Scale-Modelling of Dynamic Networks with Applications to Power Systems. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1982

[8] *Mahmoud, M. S.; Singh, M. G.:* Large Scale Systems Modelling. Oxford, New York, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press 1981

[9] *Oswald, B.:* Effektive Berechnung der Kurzschlußstromverläufe in großen Elektroenergiesystemen durch getrennte Berechnung der Gleich- und Wechselanteile. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 9, S. 455–457

[10] *Oswald, B.; Siegmund, D.:* Effektive Berechnung von Ausgleichsvorgängen in Elektroenergiesystemen durch zeitskalierte Modelle. 31. Internationales Kolloquium der TH Ilmenau 1986. Vortragsreihe „Elektroenergieanlagen und -systeme", S. 61–64

[11] *Oswald, B.; Pundt, H.:* Three-time Scale Modelling of Power Systems for the Effective Computation of Transients. Proc. of the 9th PSCC 1987, Cascais, Protugal, pp. 407–417

[12] *Oswald, B.:* Zeitskalierte Modelle des Elektroenergiesystems. Wiss. Z. der TU Dresden 36 (1987) 4, S. 87–95

[13] *Krause, P. C.; Nozari, F.; Skvarenina, T. L.; Olive, D. W.:* The Theory of Neglecting Stator Transients. IEEE Trans. on Power App. and Sept., Vol. PAS-98 (1979) 1, pp. 141–148

[14] *Kulicke, B.:* Digitalprogramm NETOMAC zur Simulation elektromechanischer und -magnetischer Ausgleichsvorgänge in Drehstromnetzen. Elektrizitätswirtschaft 78 (1979) 1, S. 18–23

[15] *Oswald, B.:* Das PC-Programm SYMA zur Berechnung des nichtstationären Betriebsverhaltens von Synchronmaschinen im Motor- und Generatorbetrieb. Energietechnik 38 (1988) 11, S. 409–411

EA 5986

[2]) In Netzkoordinaten sind die Gleichglieder der natürlichen Größen 50-Hz-Anteile und bilden die mittleren Anteile, während die langsamen Anteile die Läuferschwingung und die Hüllkurvenänderungen der 50-Hz-Wechselanteile ausdrücken.

Berechnung elektromechanischer Ausgleichsvorgänge mit dem PC-Programm NEDYN

I. Erlich, Dresden

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *H. Pundt* zum 60. Geburtstag

Der Simulation von Ausgleichsvorgängen in Elektroenergiesystemen (EES) wird sowohl in der Ausbauplanung als auch in der operativen Betriebsführung eine steigende Bedeutung beigemessen. Dabei geht es um die Berechnung der elektrischen und mechanischen Beanspruchungen von Anlagen, des zu erwartenden Systemverhaltens sowie um die Klärung der Ursachen aufgetretener Störungen. Es zeigt sich, daß immer mehr Ingenieure in der Lage sein müssen, mit den entsprechenden Simulationsprogrammen zu arbeiten und die Ergebnisse richtig zu interpretieren. Während in der Vergangenheit nur einige wenige Spezialisten Ausgleichsvorgänge berechnet haben — meist auch an der Programmentwicklung beteiligt —, erfordert heute die Vielzahl der zu bearbeitenden Aufgaben die Durchführung von Berechnungen auch von Nichtspezialisten. Die uns bereits zur Verfügung stehende arbeitsplatzbezogene Rechentechnik, die Personalcomputer (PC), ermöglichen es andererseits, Ausgleichsvorgänge wesentlich effektiver als bisher auf Großrechnern zu simulieren. Diese PC haben bereits einen großen Speicherplatz für die Modellierung umfangreicher Netze und sind in der Verarbeitungsgeschwindigkeit ausreichend für die Berechnung langanhaltender Prozesse. Einer der wesentlichen Vorteile besteht darin, daß der Bearbeiter direkt am Arbeitsplatz und zu beliebiger Zeit mit dem Rechner kommunizieren kann. Es ist also möglich, bei Bedarf Fragen und Probleme sofort zu klären.

In diesem Beitrag soll über die im Zusammenhang mit der Erstellung des PC-Digitalprogramms NEDYN (NEtzDYNamik) zur Berechnung elektromechnaischer Ausgleichsvorgänge in EES durchgeführten Untersuchungen zur Modellbildung und Programmgestaltung berichtet werden. Im Vordergrund der Forschungsarbeiten stand, neue oder verbesserte Modelle und Algorithmen zu entwickeln, die auf einem PC vorteilhaft unter Beachtung moderner Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Variationsmöglichkeit implementierbar sind. Zum Schluß werden einige Berechnungsergebnisse mit dem neuen Programm vorgestellt.

1. Modellierung der Systemelemente

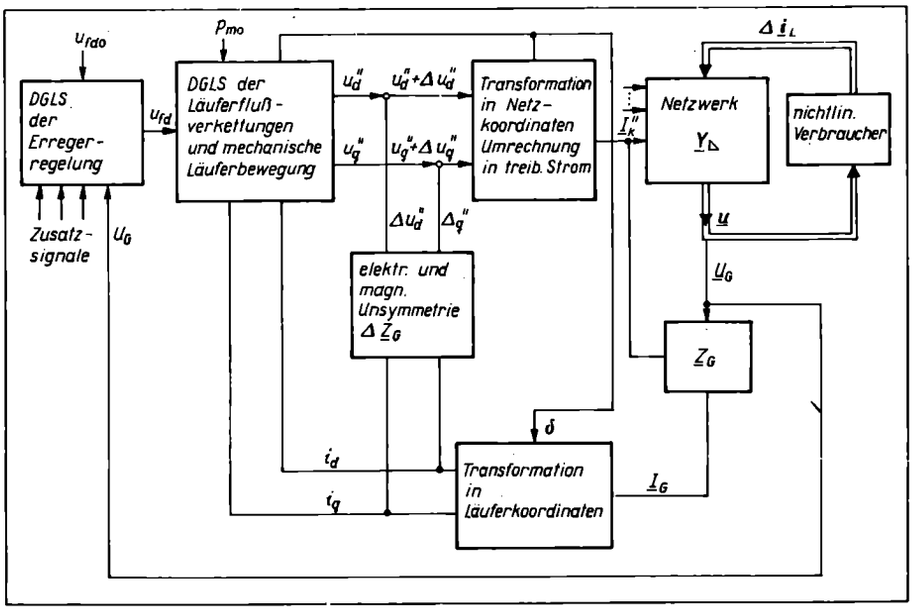
1.1. Synchronmaschine und Regler

Bei der Nachbildung von Synchronmaschinen ist es aus der Sicht der praktischen Anwendung zweckmäßig, Modelle unterschiedlicher Genauigkeit zu verwenden. Der Bearbeiter kann dann entsprechend seinen Anforderungen und den ihm zur Verfügung stehenden Parametern zwischen den Modellen wählen. Für das Programm NEDYN sind Modelle 5., 4. und 2. Ordnung nach der Methode der „singular perturbation" [1] aus den ausführlichen Systemgleichungen entwickelt worden. Die Tafel 1 enthält eine Charakterisierung der verwendeten Modelle. Allen Synchronmaschinenmodellen ist gemeinsam, daß die Kopplung mit dem quasistationären Netz über Stromquellenströme erfolgt. Diese selbst sind Funktionen der Läufergrößen, Flußverkettung und Positionswinkel und werden über die Integration von Differentialgleichungen bestimmt. Die Struktur des Synchronmaschinenmodells im Zusammenwirken mit dem Netz ist aus Bild 1 zu entnehmen. Ein besonderes Interesse verdient das Modell G5-1, bei dem gegenüber der klassischen Vorgehensweise — Vernachlässigung der transformatorischen Anteile der Ständerflußverkettung $\dot{\psi}_s = 0$ — lediglich die Änderung der subtransienten Ständerstreuflußverkettungen $\dot{\psi}_{\sigma s}'' = 0$ gesetzt wurde. Dieses Modell hat sehr gute Übereinstimmung mit gemessenen Verläufen im Asynchronlauf gezeigt [2].

Die mathematische Beschreibung der Synchronmaschine erfolgt ausgehend von den Eigenparametern des Wicklungsmodells. Eingabegrößen im Programm sind entweder diese Eigen- oder die aus

Dr.-Ing. *Istvan Erlich* ist wissenschaftlicher Oberassistent an der TU Dresden, Sektion Elektrotechnik.

Bild 1. Struktur des quasistationären Synchronmaschinenmodells



den Herstellerangaben bekannten Systemparameter. Die Umrechnungen in die Modellparameter führt der Rechner durch, wobei, falls die Leerlauf- und Kurzschlußkennlinien angegeben werden, die elektromagnetische Sättigung berücksichtigt werden kann.

Ausführliche Synchronmaschinenmodelle (5. und 4. Ordnung) erfordern meist auch die Nachbildung des Erregersystems. Im Programm NEDYN ist die Reglermodellierung so organisiert, daß zu jeder Synchronmaschine ein Reglertyp aus den im Programm enthaltenen Varianten ausgewählt werden kann. Bisher sind sieben verschiedene Erregersysteme nachgebildet worden. So existieren zwei Modelle für Systeme mit Gleichstrom-Erregermaschinen, zwei für Systeme mit Wechselstrom-Erregermaschinen, und für statische Erreger sind drei Modelle vorhanden. Sie sind zum Teil Standardmodelle nach Empfehlungen der zuständigen IEEE-Arbeitsgruppe [3], aber auch solche, die im Zusammenhang mit speziellen Untersuchungen entstanden. Bei Bedarf ist eine Ergänzung durch neue oder modifizierte Varianten aufgrund der modulmäßigen Einbeziehung ins Programm leicht möglich. Das Programm ermöglicht ebenfalls die Nachbildung des Verhaltens der Turbine bei Generatoren und des Widerstandsmoments der Arbeitsmaschine bei Synchronmotoren während des Ausgleichsvorgangs. So kann z.B. die Primärregelung bei Turbogeneratoren in einfacher Form berücksichtigt werden.

1.2. Übertragungsnetz, Lasten

Die Bedeutung der Nachbildung dieser Systemelemente erwächst daraus, daß bei der Berechnung ein wesentlicher Teil der Rechenzeit für die Lösung der entsprechenden algebraischen Gleichungssysteme benötigt wird. Eine weitgehende Optimierung der Algorithmen ist deshalb erforderlich. Beschreibt man das Netz nach dem

Tafel 1

Bezeichnung	Modell $\underline{I}_{kG}$ — $\frac{1}{\underline{Z}_G}$ — $\underline{U}$	Zustandsgrößen	Ansätze zur Herleitung
G5-1	$Re\{\underline{Z}_G\} = f(r, r_{fd}, r_{Dd}, r_{Dq})$ $Im\{\underline{Z}_G\} = g(x_d'', x_q'')$ $I_{kG} = h_1(\psi_{fd}, \psi_{Dd}, \psi_{Dq}, u_{fd}, \omega_L, \delta, u_d, u_q)$	ψ_{fd}, ψ_{Dd} ψ_{Dq} ω_L δ	$\varepsilon \to 0$ für $\varepsilon\, \dot{\psi}_{Gd}^{"IN}$ $\varepsilon\, \dot{\psi}_{Gq}^{"IN}$
G5-2	$Re\{\underline{Z}_G\} = r$ $Im\{\underline{Z}_G\} = g(x_d'', x_q'')$ $\underline{I}_{kG} = h_2(\psi_{fd}, \psi_{Dd}, \psi_{Dq}, \delta, u_d, u_q$	ψ_{fd}, ψ_{Dd} ψ_{Dq} ω_L δ	$\varepsilon \to 0$ für $\varepsilon\, \dot{\psi}_d^{IN}$ $\varepsilon\, \dot{\psi}_q^{IN}$
G4	$Re\{\underline{Z}_G\} = r$ $Im\{\underline{Z}_G\} = g(x_d', x_q)$ $I_{kG} = h_3(\psi_{fd}, \psi_{Dq}, \delta, u_d, u_q$	ψ_{fd} ψ_{Dq} ω_L δ	$\varepsilon \to 0$ für $\varepsilon\, \dot{\psi}_d^{IN}$ $\varepsilon\, \dot{\psi}_q^{IN}$ $\varepsilon\, \dot{\psi}_{Dd}$
G2	$Re\{\underline{Z}_G\} = r$ oder r_{ers} $Im\{\underline{Z}_G\} = x_d'$ oder x_{ers} $\underline{I}_{kG} = \underline{I}_{kG}(0)\, e^{j\Delta\delta}$ $\underline{I}_{kG}(0) = -\frac{\underline{U}_{tr}(0)}{\underline{Z}_G}$ $\underline{U}_{tr}(0)$: Spannung hinter $\underline{Z}_G$ im stationären Zustand	ω_L δ	wie bei G4 und zusätzlich $\psi_{fd} = \psi_{fd}(0) = konst.$ $\psi_{Dq} = \psi_{Dq}(0) = konst.$ oder $\psi_{Ers} = \psi_{Ers}(0) = konst.$

```
BERECHNUNG ELEKTROMECHANISCHER AUSGLEICHSVORGAENGE
IN ELEKTROENERGIESYSTEMEN
NEDYN (V. 1.3, 1988)
Technische Universitaet Dresden, Sektion Elektrotechnik
Institut fuer Energieversorgung Dresden

=> Auswahl der Netzdatei
   Auswahl Laufwerk/Pfad
   Eingabe der Fehlerfolge und Berechnung
   Berechnung des stationaeren Leistungsflusses
   Aendern/Neueingabe/Druck der Synchronmaschinendaten
   Ausgabe der Ergebnisse auf Bildschirm (Tabelle)
   Ausgabe der Ergebnisse auf Drucker (Tabelle)
   Ausgabe der Ergebnisse auf Bildschirm (Graphik)
   Ende NEDYN

Keine Datei in Bearbeitung
Pfad:          C:\ERLICH\
```

Bild 2. Hauptmenü des Programms NEDYN

Bild 3. Fehlerauswahlmenü

```
BERECHNUNG ELEKTROMECHANISCHER AUSGLEICHSVORGAENGE
IN ELEKTROENERGIESYSTEMEN

Eingabe der Fehlerdaten

Moegliche Zustandsaenderungen:

   Keine (weiteren) Zustandsaenderungen
=> Dreipoliger Kurzschluss
   Einseitige Leitungsschaltung
   Zweiseitige Leitungsschaltung
   Lastschaltung
   Unterbrechung der Erregung
   Sprung der Erreger-Sollwertspannung
   Widerstandslose Verbindung v. Knoten
   Einseitige Leitungschaltung mit Kurzschluss

↑↓ Vorwaehlen  ↵ = Ausfuehren
```

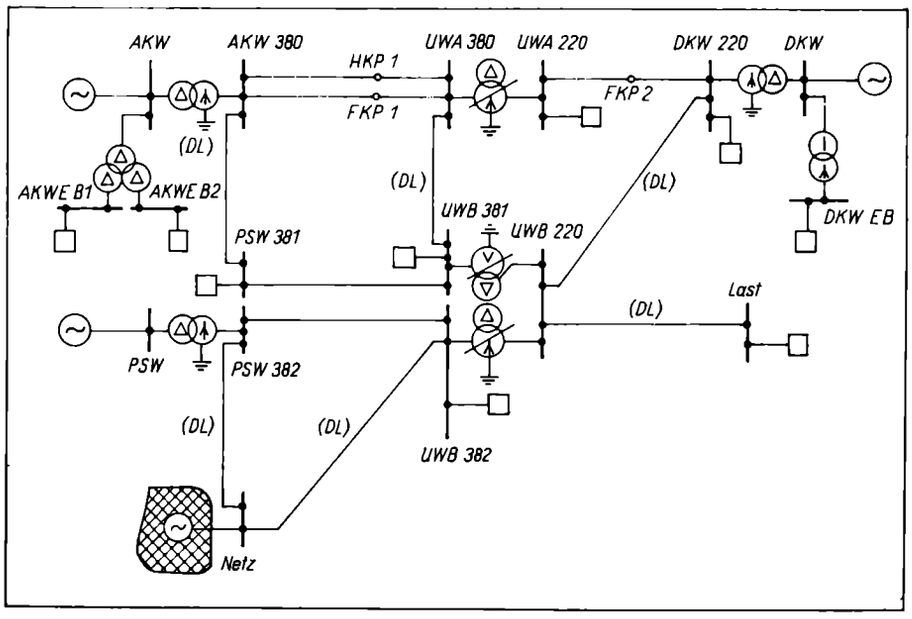


Bild 5. Testnetz

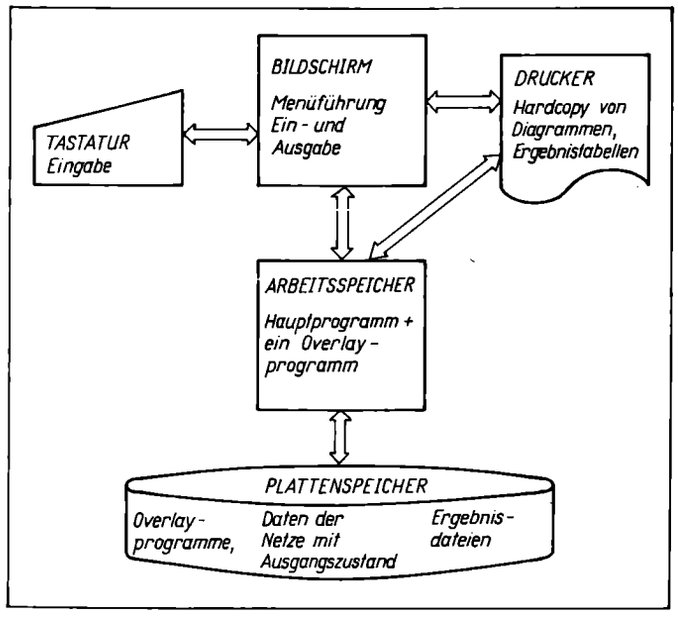


Bild 4. Arbeitsweise von NEDYN auf dem PC

Knotenpunktverfahren, so sind seitens der Synchronmaschine statt treibender Spannungen treibende Ströme einzusetzen. Ebenfalls in Form von Strömen (Zusatzströmen) muß die Nichtlinearität der Lasten vorliegen. Die Abweichung von der quadratischen Spannungsabhängigkeit der Wirk- und Blindleistung der Lasten wird, ausgehend von der bekannten exponentiellen Darstellung, im Programm NEDYN durch die ersten zwei Glieder der TAYLOR-Reihe approximiert.

$$\Delta P = P_0 \left[(p_u - 2) \cdot \frac{\Delta U}{U_0} + \frac{1}{2} (p_u^2 - p_u - 2) \left(\frac{\Delta U}{U_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\Delta Q = Q_0 \left[(q_u - 2) \cdot \frac{\Delta U}{U_0} + \frac{1}{2} (q_u^2 - q_u - 2) \left(\frac{\Delta U}{U_0} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Diese Näherung wurde wegen der Rechenzeitreduzierung eingeführt und ist, wie Testrechnungen ergaben, in den meisten Fällen ohne praktisch bemerkenswerten Genauigkeitsverlust anwendbar.
Die Transformatoren werden im Programm durch Pi-Ersatzschaltbilder dargestellt [4]. Sie ermöglichen einerseits die Berücksichtigung beliebiger Reglerstellungen und andererseits auch den direkten Übergang zwischen den einzelnen Spannungsebenen, so daß die Netzelemente unterschiedlichen Spannungsniveaus nicht auf eine einheitliche Berechnungsebene umgerechnet werden müssen. Die alternative Möglichkeit, die Regelstellung der Transformatoren über Zusatzströme zu berücksichtigen [4], wäre bei der Ausgleichsvorgangsberechnung in bezug auf die Gesamtrechenzeit ungünstiger. Die Zusatzstrommethode erfordert Iteration, und ihr Vorteil — diagonalsymmetrische Admittanzmatrix — kommt im Zusammenhang mit der verwendeten *LU*-Faktorisierung [5] nicht zum Tragen.
Die *LU*-Faktorisierung ermöglicht, neben kurzen Rechenzeiten die Diagonalunsymmetrie ($Y_{ik} \neq Y_{ki}$) ohne zusätzlichen Aufwand zu berücksichtigen. Die Admittanzmatrix wird bei jeder netzseitigen Veränderung (Schalthandlungen, Fehler) neu dreieckfaktorisiert.
Eine Iteration im Lösungsprozeß ist wegen spannungsabhängiger Lasten und der Unsymmetrie in der Synchronmaschine (z.B. $x_d'' \neq x_q''$) erforderlich. Hierzu sind jedoch auch in kritischen Fällen 2 bis 3 Schritte ausreichend.

2. Leistungsfähigkeit des Programms

Im Bild 2 ist das Hauptmenü des Programms NEDYN mit den wichtigsten Funktionen zu sehen. Es ist für

240 Knotenpunkte,
350 Leitungen und Regeltransformatoren,
50 Synchronmaschinen

dimensioniert und benötigt dabei etwa 300 kByte Speicherplatz. NEDYN ist lauffähig auf allen IBM-kompatiblen PC unter dem Betriebssystem MS-DOS. Für die Berechnung des stationären Leistungsflusses steht das PC-Leistungsflußprogramm LEIF [6] zur Verfügung. Die Übernahme der Eingabedaten und Ergebnisse von LEIF erfolgt automatisch. Das Übertragungsnetz wird einpolig aufbereitet (Mitsystem), so daß nur symmetrische Zustandsänderungen möglich sind. Programmiert sind, wie auch aus Bild 3 hervorgeht, Kurzschlüsse, ein- und zweiseitige Leitungsschaltungen, Lastschaltungen, widerstandslose Verbindungen (z.B. für Sammelschienenkoppelschalter), Sollwertsprünge an Spannungsreglern und Erregerausfälle bei Synchronmaschinen. Diese Störungen können beliebig kombiniert, in zeitlicher Reihenfolge eingeleitet oder aufgehoben werden. Neben den wichtigsten Größen der Synchronmaschinen, Ankerstrom und -spannung, Leistung, Polradwinkel, Schlupf, Erregerspannung und -strom, können auch ausgewählte Leitungs- oder Transformatorströme sowie Knotenspannungen berechnet werden. Diese Ergebnisse speichert das Programm in Dateien, die entweder zeitweilig bis zum nächsten Simulationslauf oder dauerhaft auf dem externen Plattenspeicher erhalten bleiben. Aus den Ergebnisdateien können Tabellen oder Graphiken (Zeitverläufe oder Ortskurven) auf Bildschirm oder Drucker ausgegeben werden. Bild 4 verdeutlicht die Arbeitsweise des Programms NEDYN bezüglich der einzelnen Rechnerkomponenten. Auch bei der Ergebnisdarstellung wurde auf die bedienerfreundliche Gestaltung besonderen Wert gelegt. Die Rechenzeiten sind abhängig vom Problemumfang und den verwendeten Modellen. So dauert z.B. die Berechnung der transienten Stabilität in einem Netz, bestehend aus 160 Knoten, 200 Leitungen, 37 Generatoren, auf dem Schneider-PC 1512 ohne Coprozessor etwa 3 min.
Als wichtige praktische Problemkreise können im Zusammenhang mit der Anwendung des Programms genannt werden:

— Berechnung der Stabilität bei verschiedenen Fehlern und Fehlerfolgen

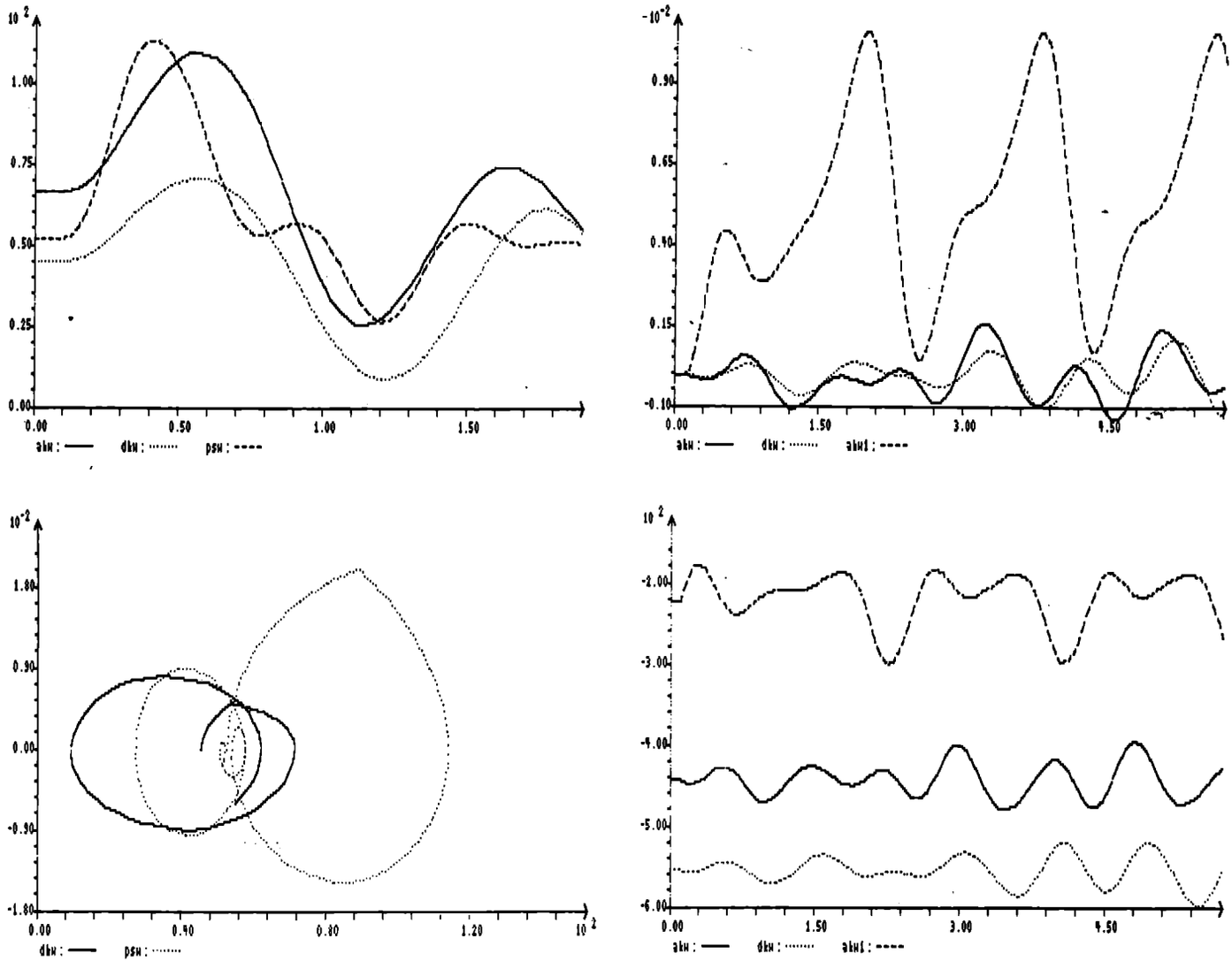


Bild 6. Dreipoliger Kurzschluß im Testnetz, Knoten FKP1
a) (oben) Zeitverläufe der Polradwinkel $\delta = f(t)$;
b) (unten) Schlupf über Polradwinkel Schlupf $= f(\delta)$
(δ in grad, t in s, Schlupf pu)

— Berechnung der Zeitverläufe von ausgewählten Strömen und Spannungen im Netz während des Ausgleichsvorgangs
— Untersuchung des Asynchronlaufs von Synchronmaschinen
— Untersuchung des Verhaltens der Erregerregelung
— Berechnung des Systemverhaltens bei Last- und Leitungsschaltungen sowie Netzumschaltungen.

Die Bilder 6 und 7 zeigen Beispiele zum Programm NEDYN. Die Berechnungen wurden in einem Testnetz von Bild 5 durchgeführt. Die Bilder 6a) und 6b) enthalten Ergebnisse einer transienten Stabilitätsuntersuchung. Dargestellt sind die Polradwinkelverläufe als Zeitfunktionen und der Schlupf mit dem Polradwinkel als Ortskurve. Auf den Bildern 7a) bis 7c) wurden der Schlupf, die elektrische Leistung sowie einige Transformator- und Leitungsströme beim Asynchronlauf eines Generators infolge Erregerverlust im Kraftwerk AKW gezeichnet.
Die bisherigen Erfahrungen mit dem Programm NEDYN zeigen, daß die Berechnung elektromechanischer Ausgleichsvorgänge nicht nur möglich, sondern auch mit entscheidenden Vorteilen verbunden ist. Auf dem Gebiet der Ausgleichsvorgangsberechnung bewirkt diese Technik eine qualitative Änderung in Richtung des erweiterten Praxiseinsatzes.

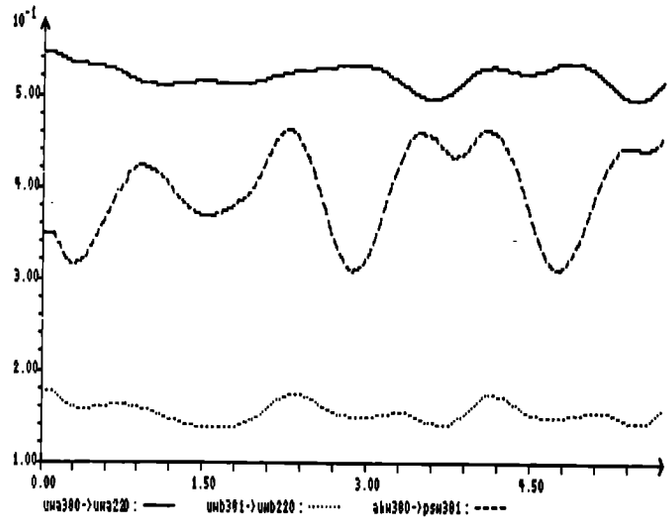


Bild 7. Asynchronlauf eines Generators AKW1 im Testnetz, Kraftwerk AKW infolge Erregerverlust
Zeitverläufe von: a) (oben) Schlupf $= f(t)$; b) (Mitte) Leistung $P_{el} = f(t)$; c) (unten) Ströme über Transformatoren und Leitungen $I = f(t)$ (P_{el} in MW, I in kA)

Literatur

[1] *Chow, J. H.:* Time-Scale Modelling of Dynamic Networks with Application to Power Systems. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1982
[2] *Funke, H.; Erlich, I.:* Modellierung der geregelten Synchronmaschine zur Simulation quasistationärer Betriebsvorgänge. ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) (in Vorbereitung)
[3] IEEE Working Group: Exitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Committee Report. IEEE Trans. on PAS PAS-100 (1981) 2, S. 494–509
[4] *Schultheiss, F.; Wesenigk, K. D.:* Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze. Band II: Übertragungsberechnung. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1971
[5] *Schendel, K.:* Sparse-Matrizen. München, Wien: R. Oldenbourg-Verlag 1977
[6] *Bluemel, D.:* Lastfluß- und Kurzschlußstromberechnung auf PC. Energietechnik 38 (1988) 8, S. 299–302

EA 5987

Schnelle elektromagnetische Ausgleichsvorgänge beim Schalten von Hochspannungs-Asynchronmotoren

J. Krause, Berlin

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *H. Pundt* zum 60. Geburtstag

In den vergangenen Jahren mußte international eine Häufung von Ausfällen rotierender elektrischer Hochspannungsmaschinen festgestellt werden. Die meisten der Maschinenschäden sind ein Resultat der elektrischen Überbeanspruchung der Wicklungslängsisolierungen bei Schaltvorgängen. Ursache dieser Entwicklung ist zum einen das Streben nach hoher Materialökonomie im Elektromaschinenbau und zum anderen das unvollständige Vorschriften- und Standardwerk in bezug auf die Einbeziehung der rotierenden elektrischen Hochspannungsmaschinen in die Isolationskoordination. Da mit zunehmender Automatisierung der Produktion die Ausfallfolgekosten stark ansteigen, ist die Betriebszuverlässigkeit der Maschinen von großer Bedeutung.

In Ergänzung experimenteller Arbeiten wurde zur Erweiterung des Erkenntnisstandes über die Physik der elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge ein digitales Rechenprogramm entwickelt, das die Ermittlung der schnellen transienten Spannungs-Zeit-Verläufe in Wicklungen bei Schaltvorgängen ermöglicht. Nach kurzer Vorstellung des dem Programm zugrunde liegenden Algorithmus wird eine Auswahl der ersten Berechnungsergebnisse vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Ermittlung der Spannungsverteilung in der Eingangsspule bei einlaufenden steilflankigen Schaltimpulswellen und in der Darstellung einiger wesentlicher Einflußfaktoren auf diese Spannungsverteilung.

1. Mathematisches Modell und Berechnungsverfahren

Das den Berechnungen zugrunde liegende mathematische Modell ergibt sich aus der Nachbildung der Wicklung durch ein Netzwerk induktiv und kapazitiv gekoppelter, konzentrierter Wicklungselemente und dem Modell des aus Anschlußkabel und speisender Sammelschiene bestehenden vorgelagerten Netzwerkes mit verteilten Parametern. Als Berechnungsverfahren wurde das Differenzenleitwertverfahren nach *Dommel* [1] ausgewählt, das dieser Modellstruktur angepaßt ist. Es setzt sich aus einem Wanderwellenverfahren zur Berechnung der Spannungs-Zeit-Verläufe auf der Leitung, der Anwendung der Trapezregel zur numerischen Integration der Differentialgleichungen für Induktivitäten und Kapazitäten und der Knotenspannungsanalyse zusammen. Der Algorithmus wurde für die Berechnung der elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge in Wicklungen aufbereitet und liegt als Programmpaket am Großrechner BESM 6 [2] und am Bürocomputer [3] vor. Schalt- und Resonanzvorgänge können dreiphasig mit Spulen als Wicklungselemente berechnet werden. Ist das Ziel der Berechnung die Ermittlung der schnellen transienten Spannungs-Zeit-Verläufe in der Eingangsspule bei einlaufenden Impulswellen mit Stirnzeiten von $t_s \leqq 1\ \mu s$, wird einphasig mit dem Modell der in Windungen unterteilten ersten drei Spulen des gestoßenen Stranges gerechnet (Bild 1).

Die Parameter des Wicklungsmodells werden aus der Wicklungsgeometrie und den Werkstoffkennwerten der eingesetzten Leiter- und Isoliermaterialien berechnet. Nur die Gegeninduktivitäten müssen gegenwärtig noch an der Originalwicklung gemessen werden. Bei der am Großrechner realisierten Variante werden die Modellparameter der Wicklung von Hand ausgerechnet. Die BC-Variante ist nur zur einphasigen Berechnung der Spannungsverteilung innerhalb der Eingangsspule bei einlaufenden steilflankigen Schaltimpulswellen geeignet.

Bei einem Vergleich zwischen Messung und Berechnung an der Wicklung einer als Typenvertreter ausgewählten Hochspannungs-Asynchronmaschine wurde beim maximalen Spulenspannungsabfall eine Abweichung von weniger als 5% festgestellt.

2. Spannungsverteilung in der Wicklung bei einlaufenden Schaltimpulswellen

Zur Ermittlung der Verteilung der maximalen Spulenspannungsabfälle in der Wicklung eines Typenvertreters ($U_n = 6$ kV, $P = 800$ kW, 9 Windungen je Spule, 18 Spulen je Strang, 6polig) bei einlaufenden Schaltimpulswellen wurde zunächst mit einem dreiphasigen, in Spulen unterteilten Wicklungsmodell gerechnet, das alle signifikanten Kopplungen der Spulen untereinander und gegen Erde berücksichtigt. Bei Einlaufen einer 0,2/10 µs-Impulswelle in die Wicklung wurde über der Eingangsspule des gestoßenen Stranges der maximale Spulenspannungsabfall von 92% der maximalen Leiter-Erde-Klemmenspannung $\hat{u}_{KL}$ berechnet. Über der zweiten Spule beträgt der maximale Spannungsabfall noch 49%, während er im Bereich des Sternpunktes im Bereich von weniger als 20% liegt.

Die Ursache für die von der Klemme aus abnehmenden Spulenspannungsabfälle liegt in der Abflachung der Welle beim Durchlaufen der Wicklung. Diese Abflachung der Wellenstirn ist durch die Tiefpaßwirkung der Spulen begründet, die maßgeblich von den großen Leiter-Erde-Kapazitäten der Spulen herrührt. Die neben dem laufzeitabhängigen Wanderwellenprozeß vorhandene Wirkung der induktiven und kapazitiven Kopplungen der Spulen untereinander beeinflußt die maximalen Spulenspannungsabfälle kaum.

Der hohe Spannungsabfall über der Eingangsspule führt dazu, daß dort auch die höchsten Windungsspannungsabfälle auftreten und die Beanspruchung der Längsisolierung besonders hoch ist. Am in Windungen unterteilten Modell der Eingangsspule und der folgenden zwei Spulen wurden die Spannungs-Zeit-Verläufe und die Verteilung der maximalen Windungsspannungsabfälle in der Eingangsspule ermittelt (Bild 2). Es ist zunächst erkennbar, daß die Spannung an der Klemme der Maschine (1) annähernd den doppelten Wert der Leiter-Erde-Spannung der speisenden Sammelschiene $\hat{u}_0$ erreicht. Dieser Effekt ist auf die Brechung der über das Kabel einlaufenden Welle am höheren Wellenwiderstand der Wicklung zurückzuführen.

Für eine Stirnzeit der einlaufenden Welle von $t_s = 1{,}0\ \mu s$ ergibt sich eine fast lineare Verteilung der maximalen Windungsspannungsabfälle Δu_W in der Eingangsspule. Die Spannungs-Zeit-Verläufe nach der dritten (4), sechsten (7) und neunten Windung (10) unterscheiden sich nur wenig vom Klemmenspannungsverlauf (1) (leichte Abflachung). Abgesehen von der offensichtlich durch die Längskapazitäten verursachten schnellen Spannungsanhebung an allen Punkten der Spule dominiert die laufzeitgebundene Wanderwelle bei der Ausbildung der Anfangsspannungsverteilung.

Läuft eine Impulswelle mit einer Stirnzeit von 0,2 µs in die Eingangsspule ein, unterscheiden sich die Spannungs-Zeit-Verläufe an verschiedenen Punkten der Eingangsspule in der Form signifikant voneinander. Die Spannungsverteilung ist stark nichtlinear; der höchste Windungsspannungsabfall tritt über der vorletzten Windung auf. Wegen der Nichtlinearität der Verteilung der Windungsspannungsabfälle liegt die maximale Windungsspannung bei $t_s = 0{,}2\ \mu s$ beim 2,5fachen gegenüber dem Wert bei $t_s = 1{,}0\ \mu s$, während die maximale Spulenspannung nur das etwa 1,9fache erreicht.

Die eigentümliche Verzerrung der Spannungs-Zeit-Verläufe läßt sich nicht mehr mit der Abflachung der Welle, der These von der kapazitiven Anfangsspannungsverteilung o.ä. erklären. Diese Erklärungen treffen auf die in Spulen unterteilte Strangwicklung mit einem Verhältnis von Längs- zu Querkapazitäten von etwa 1:10 und mit relativ großen Spulenselbstinduktivitäten (100-µH-Bereich) zu. Wird die in Windungen unterteilte Spule als Betrachtungsgrundlage gewählt, dreht sich das Verhältnis von Längs- zu Querkapazitäten in etwa um, und es muß mit Windungsselbst- und Gegeninduktivitäten im 1-µH-Bereich gerechnet werden.

Der Vorgang muß als Überlagerung des laufzeitgebundenen Wanderwellenanteils und der Wirkungen der sehr engen kapazitiven und induktiven Kopplungen zwischen den Windungen der Spule betrachtet werden. Der Spannungsanstieg an allen Punkten der Spule, noch bevor der Wanderwellenanteil das Spulenende (10) erreicht hat, ist auf die Wirkungen der Längskapazitäten zwischen benachbarten Windungen zurückzuführen. Dieser Spannungsanstieg wäre aber besonders am Spulenende viel steiler, wenn die relativ großen Gegeninduktivitäten zwischen den Windungen nicht vorhanden wären. Sie sind dafür verantwortlich, daß die Spannung am Spulen-

Dr.-Ing. *Jürgen Krause* war zur Zeit der Bearbeitung des Themas Forschungsstudent unter Betreuung von Prof. Dr.-Ing. *Koettnitz* (†) an der TU Dresden, Sektion Elektrotechnik, Wissenschaftsbereich Elektroenergietechnik und ist jetzt Ingenieur für Anlagentechnik im VEB Verbundnetz Elektroenergie.

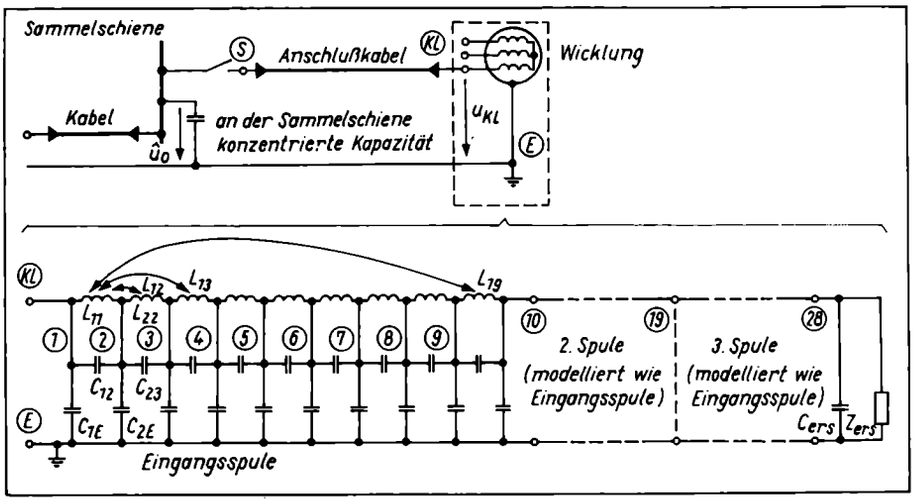


Bild 1. Ersatzschaltbild zur Berechnung der schnellen transienten Spannungs-Zeit-Verläufe in der Eingangsspule einer Hochspannungsasynchronmaschine beim Einschalten

ende während des Stromanstiegs in den Eingangswindungen durch die in den folgenden Spulen induzierten Spannungen bis zum Eintreffen des Wanderwellenanteils nur sehr langsam steigt. Die letzte Windung der ersten Spule und die erste Windung der zweiten Spule liegen im Nutgrund. Sie sind daher kapazitiv viel stärker mit dem geerdeten Ständerblechpaket gekoppelt als die Windungen in Spulenmitte (die etwa 3- bis 4fache Leiterfläche liegt dem Nutteilglimmschutz gegenüber). Durch diese große Querkapazität und die niedrige Leiter-Erde-Spannung kommt es am Ende der Spule bei Eintreffen der Stirn des Wanderwellenanteiles zu einer Reflexion der Welle, die als zeitweilige Spannungsabsenkung nacheinander an den Punkten 7, 4 und 1 zu erkennen ist. Das beschriebene Wirken der einzelnen Komponenten des Vorgangs (Wanderwellenanteil, Kopplungen in der Wicklung) wurde in [4] durchwechselseitige Vernachlässigung der Längskapazitäten und Gegeninduktivitäten im Modell der Eingangsspule nachgewiesen.

3. Leiter-Erde-Kapazitäten als vorbeugende Überspannungsschutzmaßnahme

Die hohen Windungsspannungsabfälle sind Ausdruck hoher elektrischer Feldstärken, die kurzzeitig in den Spulenlängsisolierungen auftreten. Sie haben eine Beschleunigung der elektrischen Alterung zur Folge, zumal Schaltvorgänge zu den häufigsten Betriebsvorgängen zählen und Stirnzeiten von $t_s = 0{,}2\ \mu s$ bei Schaltimpulswellen als typisch angesehen werden [5]. Elektrische Hochspannungsmaschinen sollten deshalb grundsätzlich nicht ohne Maßnahmen für den vorbeugenden Überspannungsschutz betrieben werden. Derartige Schutzbeschaltungen können Leiter-Erde-Kapazitäten, *RC*-Beschaltungen oder Längsinduktivitäten sein und sind zusätzlich zu den begrenzenden Überspannungsschutzmaßnahmen (Ableiter) zu installieren. Die Vorteile der Anschaltung von Leiter-Erde-Kapazitäten werden in [4] hervorgehoben. Im folgenden werden Berechnungsergebnisse vorgestellt, die die Wirkung der Kapazitäten in Abhängigkeit vom Ort ihrer Anschaltung zeigen. Die Kapazitäten wurden induktivitätslos modelliert; in der Praxis ist nur eine induktivitätsarme Ausführung möglich. Das Bild 3b) zeigt die Spannungs-Zeit-Verläufe in der Eingangsspule bei Installation einer idealen Kapazität von 10 nF direkt an der Klemme der Maschine. Die maximalen Windungsspannungsabfälle werden auf ein Niveau gesenkt, das einer Stirnzeit der einlaufenden Welle von mehr als 1 µs entspricht (Bild 3c). Die Kapazität beeinflußt die Amplitude der einlaufenden Welle nur wenig, führt aber zu einer Abflachung der Stirn der einlaufenden Welle. Nach [6] ergibt sich die Zeitkonstante des Ladevorgangs der Kapazität aus

$$\tau_C = C_{KL} \cdot Z_{ers}, \tag{1}$$

$$Z_{ers} = \frac{(Z_w)_K\,(Z_w)_M}{(Z_w)_K + (Z_w)_M}. \tag{2}$$

Es gilt $Z_{ers} \approx (Z_w)_K$ wegen $(Z_w)_K \ll (Z_w)_M$. Der Wert C_{KL} bezeichnet die Leiter-Erde-Schutzkapazität an der Klemme, $(Z_w)_K$ und $(Z_w)_M$ sind die Wellenwiderstände von Kabel und Maschinenwicklung.
Wird dieselbe Leiter-Erde-Kapazität $C_S = C_{KL}$ am speiseseitigen Ende des Anschlußkabels (S) installiert, so ergeben sich die Spannungs-Zeit-Verläufe nach Bild 3a). Die Amplitude der Leiter-Erde-Spannung an der Klemme der Maschine überschreitet den 2fachen Wert der Leiter-Erde-Spannung der speisenden Sammelschiene $\hat{u}_0$, und die Stirn der einlaufenden Welle wird weniger abgeflacht als bei Anschaltung der Kapazität an der Maschinenklemme. Ursache der hohen Amplitude der Leiter-Erde-Spannung sind die Stromabbauwellen, die durch die Induktivitäten des speisenden Sammelschienenabschnitts erzeugt werden und zu einer Aufladung der Kapazität am speiseseitigen Kabelende auf eine höhere Spannung als $\hat{u}_0$ führen. Die Brechung der über das Kabel einlaufenden Welle an der Maschinenklemme führt schließlich zu der Leiter-Erde-Spannung an der Klemme $\hat{u}_{KL} > 2\,\hat{u}_0$. Die Zeitkonstante des Ladevorganges der Schutzkapazität muß in diesem Fall mit folgendem Ersatzwellenwiderstand berechnet werden:

$$Z_{ers} = \frac{(Z_w)_K \cdot (Z_w)_{SS}}{(Z_w)_K + (Z_w)_{SS}}. \tag{3}$$

$(Z_w)_{SS}$ ist der Wellenwiderstand der speisenden Sammelschiene.
Da $(Z_w)_K < (Z_w)_{SS} \ll (Z_w)_M$ gilt, ergibt sich hier eine kleinere Zeitkonstante τ_C als bei Installation der Schutzkapazität an der Klemme und damit eine steilere Stirn der in die Wicklung einlaufenden Welle. Erst eine Vergrößerung der am speiseseitigen Kabelende installierten Kapazität auf den 20- bis 30fachen Wert einer Schutzkapazität an der Maschinenklemme führt zum selben niedrigen Beanspruchungsniveau der Spulenlängsisolierungen (Bild 3c).
Grundsätzlich ist daher die Anordnung einer Leiter-Erde-Kapazität im Klemmkasten der Maschine zu empfehlen. Sollte dort kein ausreichender Platz vorhanden sein, ist aber auch die Installation von Kondensatoren mit größerer Kapazität am speiseseitigem Ende des Anschlußkabels möglich.
Kondensatoren zur Einzelkompensation bewirken i.allg. eine ausreichende Abflachung der Wellenstirn.

4. Einfluß der Permittivitäten von Haupt- und Windungsisolierung auf die Spannungsverteilung in der Eingangsspule

Als Beispiel, wie auch der Aufbau der Wicklung selbst und die eingesetzten Materialien das Beanspruchungsniveau bei einlaufenden Schaltimpulswellen beeinflussen, werden Berechnungsergebnisse mit variierten Permittivitäten der Isolierungen vorgestellt. Ausgegangen wird von der Beaufschlagung des der Originalwicklung entsprechenden Wicklungsmodells mit einer Impulswelle 0,2/10 µs (Bild 2b). Die Permittivitäten der Hauptisolierung $(\varepsilon_r)_H$ und der Windungsisolierung $(\varepsilon_r)_D$ sind hier mit dem Wert 5 angenommen. Werden die Kapazitäten im Wicklungsersatzschaltbild so verändert, daß Permittivitäten von $(\varepsilon_r)_H = 5$ und $(\varepsilon_r)_D = 2$ damit nachgebildet werden, ergeben sich die Spannungs-Zeit-Verläufe im Bild 4a). Die mit Verkleinerung der Permittivität der Windungsisolierung kleinere Kapazität zwischen benachbarten Windungen führt dazu, daß ein signifikanter Spannungsanstieg nach Einlaufen der Impulswelle in die Wicklung erst dann einsetzt, wenn der laufzeitgebundene Wanderwellenanteil den betrachteten Punkt erreicht hat. Am Ende der Eingangsspule wird das besonders deutlich; dort führt die Wirkung der Gegeninduktivitäten während des Stromanstiegs in den vorgelagerten Windungen sogar kurzzeitig zu

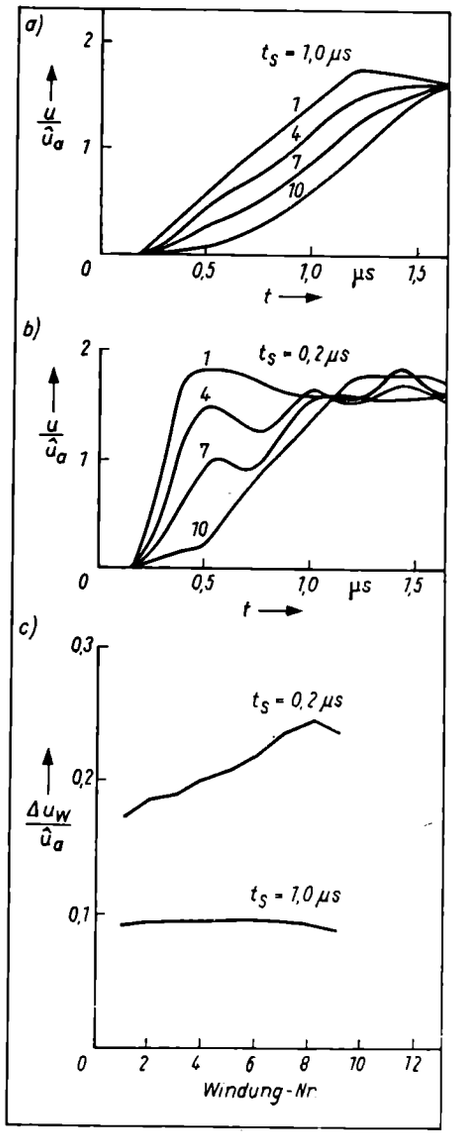


Bild 2. Spannungs-Zeit-Verläufe im Innern der Eingangsspule und Verteilung der maximalen Windungsspannungsabfälle bei verschiedenen Stirnzeiten der einlaufenden Welle

a) $u/\hat{u}_0 = f(t)$ bei $t_S = 1{,}0\,\mu s$
b) $u/\hat{u}_0 = f(t)$ bei $t_S = 0{,}2\,\mu s$
c) $\Delta u_W/\hat{u}_0 = f(n_W)$

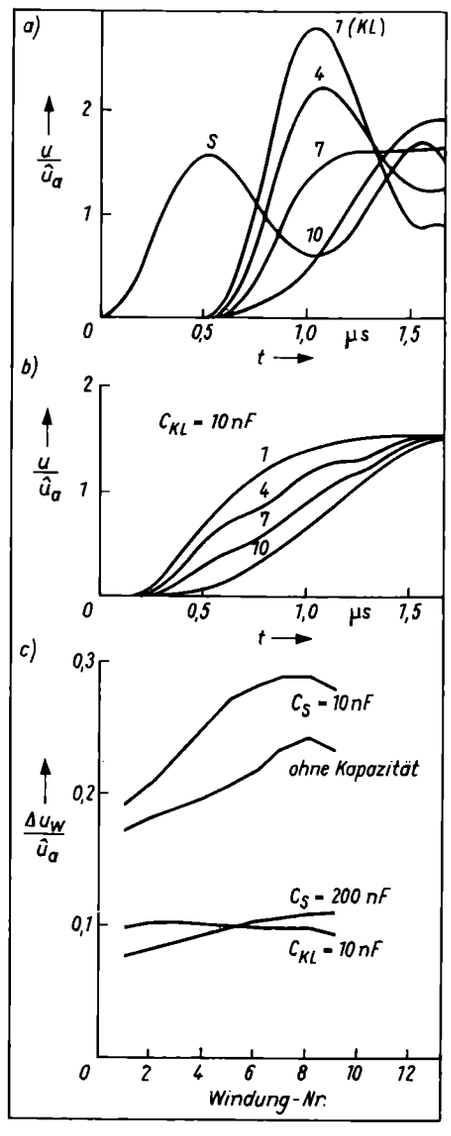


Bild 3. Spannungs-Zeit-Verläufe im Innern der Eingangsspule und Verteilung der maximalen Windungsspannungsabfälle bei Installation einer Leiter-Erde-Schutzkapazität

a) $u/\hat{u}_0 = f(t)$ bei $C_S = 10$ nF am speiseseitigen Ende des Anschlußkabels
b) $u/\hat{u}_0 = f(t)$ bei $C_{KL} = 10$ nF an der Klemme der Maschine
c) $\Delta u_W/\hat{u}_0 = f(n_W)$

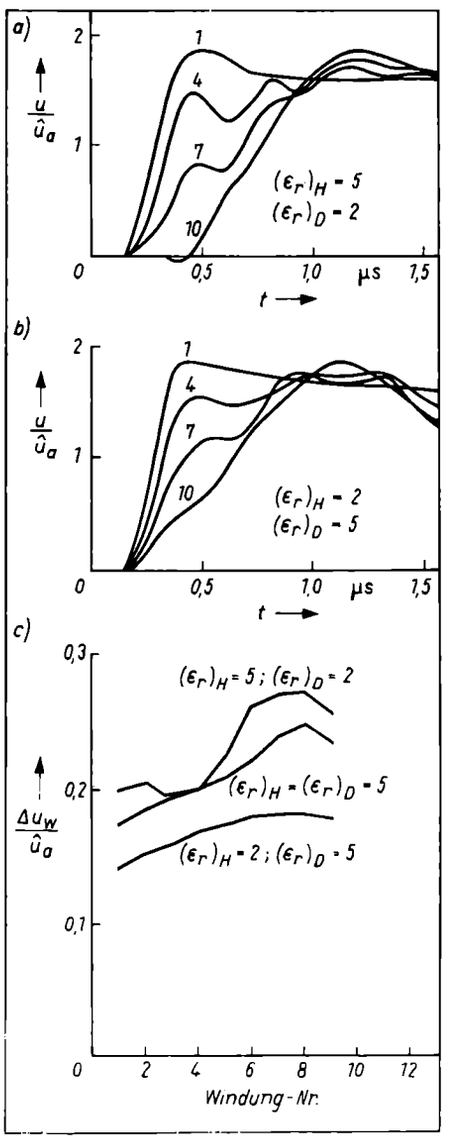


Bild 4. Spannungs-Zeit-Verläufe im Innern der Eingangsspule und Verteilung der maximalen Windungsspannungsabfälle bei verschiedenen Permittivitäten der Haupt- und Windungsisolierung

a) $u/\hat{u}_0 = f(t)$ bei $(\varepsilon_r)_H = 5$ und $(\varepsilon_r)_D = 2$
b) $u/\hat{u}_0 = f(t)$ bei $(\varepsilon_r)_H = 2$ und $(\varepsilon_r)_D = 5$
c) $\Delta u_W/\hat{u}_0 = f(n_W)$

einer negativen Leiter-Erde-Spannung. Das Ergebnis ist ein höheres Beanspruchungsniveau der Spulenlängsisolierung (Bild 4c).
Wird umgekehrt die Permittivität der Hauptisolierung auf $(\varepsilon_r)_H = 2$ gesenkt und die der Drahtisolierung bei $(\varepsilon_r)_D = 5$ festgehalten, sinkt die Laufzeit des Wanderwellenanteils (Bild 4b). Abgesehen davon steigen die Leiter-Erde-Spannungen an den inneren Knotenpunkten der Spule — besonders aber am Spulenende — schneller an als bei $(\varepsilon_r)_H = 5$, weil die kleineren Leiter-Erde-Kapazitäten schneller aufgeladen werden. Das Ergebnis ist ein erheblich verringertes Beanspruchungsniveau der Längsisolierungen. Die Nichtlinearität der Spannungsverteilung in der Eingangsspule ist wenig ausgeprägt (Bild 4c).

5. Zusammenfassung

Eine auf dem Differenzenleitwertverfahren beruhende Methode zur Berechnung von schnellen elektromagnetischen Ausgleichsvorgängen in Wicklungen wird zur Ermittlung der Verteilung steilflankiger Schaltspannungsimpulse in der Eingangsspule einer Hochspannungsasynchronmaschine genutzt.
Bei einer Stirnzeit der einlaufenden Welle von 0,2 µs ist die Spannungsverteilung in der Eingangsspule stark nichtlinear. Zu den physikalischen Ursachen wird eine These vorgestellt, die die Spannungsverteilung als Überlagerung eines laufzeitgebundenen Wanderwellenanteils und der Wirkungen der engen kapazitiven und induktiven Kopplungen der Windungen einer Spule untereinander beschreibt.
Als vorbeugende Überspannungsschutzmaßnahme für die Spulenlängsisolierungen wird anhand von Berechnungsergebnissen die Wirkung von Schutzkapazitäten am Anfang und Ende des Anschlußkabels gezeigt. Als Folgerung wird die Installation der Kapazität direkt an der Klemme der Maschine empfohlen. Weitere Berechnungsergebnisse verdeutlichen den Einfluß der Permittivitäten der Haupt- und Windungsisolierungen auf die Spannungsverteilung in der Eingangsspule.
Die vorgestellten Berechnungsbeispiele lassen erkennen, daß mit dem in [2] [3] [4] entwickelten Verfahren ein sowohl für physikalische Grundlagenuntersuchungen als auch für praktisch relevante Aufgabenstellungen geeignetes Hilfsmittel zur Ermittlung schneller transienter Spannungs-Zeit-Verläufe in Wicklungen vorliegt.

Literatur

[1] *Dommel, H. W.:* Berechnung elektromagnetischer Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen mit Digitalrechnern. Bull. SEV. 60 (1969) 12, S. 538–548

Rechnerunterstützter Entwurf von CAD-Systemen für Elektroenergieanlagen

D. Heinze; U. Butz, KDT, Leipzig

Vortrag zur Wissenschaftlichen Konferenz 1989 der TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen

Entwurf und Implementierung von CAD-Systemen für die technische Vorbereitung, insbesondere die Projektierung von Elektroenergieanlagen stellen hohe Ansprüche an die Modellierung des Arbeitsprozesses und des Arbeitsgegenstandes. Die Modellierung muß systematisch und in einheitlicher Vorgehensweise durchgeführt werden, wobei die Prinzipien der hierarchischen Strukturierung im Vordergrund stehen. Damit werden Ordnungsprinzipien im Sinne einer Systematik gewonnen, die in hohem Maße den Softwareentwurf bestimmen und durch die Softwarestruktur repräsentiert werden. Die hierbei zu fordernde strenge Modularisierung, die sich aus Strukturierung und Hierarchiebildung ergibt, ist durch die Grundstruktur von CAD-Systemen begründet. Als Grundstruktur von CAD-Systemen wird eine Untergliederung bezeichnet, die die Teile Prozeßsteuerebene, Verarbeitungsebene und Informationsbasis enthält. Im Bild 1 sind die zwischen Prozeßsteuerebene und Verarbeitungsebene bestehenden Wechselbeziehungen dargestellt, die für die Gestaltung des Arbeitsprozesses von besonderer Bedeutung sind. Diese Wechselbeziehungen sind gemäß Bild 1 durch folgende Sachverhalte gekennzeichnet:

— Jeder in der Verarbeitungsebene enthaltene Modul (Operator i) transformiert Eingangsinformationen X_i in Ausgangsinformationen Y_i, die ihrerseits wiederum Eingangsinformationen für nachfolgende Operatoren darstellen.

— Die von einem Modul (Operator i) erzeugten Informationen werden vom Menschen bewertet, d.h. akzeptiert oder nicht akzeptiert, wodurch die Eingangsinformation e_i für die Prozeßsteuerebene erzeugt wird.

— Die Prozeßsteuerebene gibt daraufhin eine vom Prozeßablauf abhängige Ausgangsinformation a_i aus, die den Start des nächsten Moduls (Operators) bedingt. Diese Art der Steuerung einzelner Operatoren bzw. Module setzt einen diskreten Prozeß voraus, der aus einer Folge von Operatoren und von diesen erzeugten Prozeßzuständen besteht. Hieraus ergeben sich die Anforderungen an die Modularisierung des zu entwerfenden CAD-Prozesses:

— Die Module, die die Operatoren der Verarbeitungsebene gemäß Bild 1 repräsentieren, sind in ihrer Funktion streng abzugrenzen, wobei die Funktion durch eine abgeschlossene ingenieurtechnische Tätigkeit geprägt ist.

— Umfangreiche und komplexe Module sind im Sinne der Rekursivität weiter zu unterteilen, so daß eine echte Prozeßhierarchie aufgebaut werden kann. Die Charakteristik der abgegrenzten Funktion bleibt hierbei erhalten.

— Jeder Operator/Modul ist streng linear zu entwerfen, wobei nur ein Eingang und eine Ausgang existiert. Eingangs- und Ausgangsinformationen sind dem Modul fest zugeordnet und als Mengen genau definiert.

— Jeder Modul kommuniziert nur mit der Informationsbasis, die für die Menge der Module die einheitliche Schnittstelle darstellt. Die Eingabe von Daten in die Informationsbasis wird durch spezielle Eingabemodule realisiert.

Dr.-Ing. *Dieter Heinze* ist wissenschaftlicher Oberassistent und Doz. Dr. sc. techn. *Ulrich Butz* ist Leiter des Wissenschaftsbereiches Softwaretechnologie an der Sektion Elektroenergieanlagen der TH Leipzig.

Fortsetzung von S. 98

[2] *Krause, J.:* Anwendung des Differenzenleitwertverfahrens zur Berechnung der elektrischen Beanspruchung von Haupt- und Windungsisolierungen rotierender Maschinen bei Schaltvorgängen. Bericht 681 TU Dresden, Sektion Elektrotechnik 1987

[3] *Hinsche, F.:* Entwicklung und Anwendung eines BC-Programmes zur Berechnung transienter Ausgleichsvorgänge in Wicklungen von Hochspannungs-Asynchronmaschinen. Diplomarbeit TU Dresden, Sektion Elektrotechnik 1987

[4] *Krause, J.:* Verteilung steilflankiger Schaltspannungsimpulse in Ständerwicklungen von Hochspannungs-Asynchronmaschinen. Dissertation A, TU Dresden 1988

[5] *Slamecka, E.:* Interruption of Small Induction Currents, Chapter 3. Electra (1981) 75, S. 5–30 und (1983) 95, S. 31–45

[6] *Koettnitz, H.; Winkler, G.; Weßnigk, K.-D.:* Grundlagen elektrischer Betriebsvorgänge in Elektroenergiesystemen. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1986

EA 5925

1. Entwurfsmethode

1.1. Prozeßmodellierung

Der Grundansatz für die Prozeßmodellierung ergibt sich allgemein aus der Abbildung einer Objekthierarchie auf eine Prozeßhierarchie (Tätigkeits-, Operationshierarchie), wie es prinzipiell im Bild 2 dargestellt ist. Dabei bezieht sich der Aspekt der Verallgemeinerung auf eine Aufgabenklasse der Fachdisziplin, hier z.B. auf den Prozeß der Projektierung einer Schaltanlage: Der im Bild 2 dargestellte Objekthierarchiegraph ist eine hierarchische Untergliederung der Schaltanlage in die Teile Einspeisung, Sammelschiene und Abnehmergruppe, während die Hierarchie des zugehörigen Prozesses durch die allgemeinen Operationen Strukturentwurf, Auswahl, Berechnen und Bewerten geprägt ist. Die Grundschaltung der Schaltanlage wird mit Hilfe der Operation „Strukturentwurf" erarbeitet, wobei diese Operation von einem bestimmten Schaltanlagentyp und damit auch von der Nennspannung der Schaltanlage unabhängig ist. Ein „Strukturentwurf" für Einspeisung und Abnehmer ist im allgemeinen nicht erforderlich, da die hier vorkommenden Strukturen bereits als wiederverwendungsfähige und katalogisierte Schaltungen vorliegen, so daß eine einfache Zuordnung zur Forderung in der Aufgabenstellung des Projekts genügt. Demgegenüber ist die Auswahl einer Schaltanlage als Gesamtheit nicht möglich. Die Realisierung wird hier durch die Anwendung der Operatoren „Auswahl", „Berechnen" und „Bewerten" auf die Teile Einspeisung, Sammelschiene und Abnehmer erreicht. Die Wechselbeziehungen der o.g. allgemeinen Operatoren untereinander und der Operatoren zur Informationsbasis sind im Bild 3 dargestellt. Prinzipiell gilt die dargestellte Folge, wobei bei fehlerhaften Ergebnissen am Ende des Prozesses zu einem Operator „Fehlerauswertung" verzweigt wird. Dabei wird in Abhängigkeit nicht akzeptierter Lösungen und der Gründe für diese Nichtakzeptierung wiederum zu einem Operator verzweigt, der die Änderung von Informationen derart gestaltet, daß beim erneuten Durchlauf im allgemeinen eine akzeptierte Lösung erreicht wird.

Der allgemeine Rahmen für die Prozeßgestaltung ist bei sequentiellen Prozessen durch den Prozeßablaufgraph (PAG) und bei nebenläufigen Prozessen durch ein Petrinetz [1] [3] beschreibbar. Im folgenden wird auf die Modellierung von Prozessen mit Hilfe von PAG und die Entwicklung eines Softwaretools für den Entwurf, die Simulation und die Steuerung eingegangen. Ein Prozeßablaufgraph ist ein gerichteter Graph, der aus definierten Knoten und Kanten aufgebaut wird. Die definierten (und damit zulässigen) Knotentypen sind:

— O (operation): Dieser Knoten repräsentiert einen Verarbeitungsmodul, der der oben dargestellten Charakteristik der Transformation von Eingangsinformationen in Ausgangsinformationen entspricht.

— R (result): Der R-Knoten repräsentiert die Bewertung eines durch den vorgeordneten O-Knoten erzeugten Ergebnisses. Das Ergebnis wird entweder akzeptiert oder nicht akzeptiert. Bei Akzeptanz wird der R-Knoten über den Ja-Zweig (1), bei Nichtakzeptanz über den Nein-Zweig (0) verlassen.

— D (decision): Einem D-Knoten ist eine Entscheidung des Nutzers (Projektanten) zuordenbar. Er ermöglicht damit die Konstruktion von Menüs auf der Grundlage umfangreicher Verzweigungsstrukturen im Prozeß. Bei Entscheidung für den definierten Inhalt des D-Knotens wird er über den 1-Zweig, ansonsten über den 0-Zweig verlassen.

Definierte (und damit zulässige) Kanten sind:

$$O \rightarrow R,\ R \rightarrow O,\ R \rightarrow D,\ D \rightarrow D,\ D \rightarrow O;$$

Insbesondere eine Kantenbildung $O \rightarrow O$ ist verboten. Der Entwerfer eines CAD-Prozesses ist damit gezwungen, nach jeder durchgeführten Operation O über den weiteren Ablauf im Prozeß anhand der festzulegenden Bewertung der Ergebnisse zu entscheiden.

1.2. Erfassung der Semantik

Die durchzuführende Modularisierung für den CAD-Prozeß einer bestimmten Aufgabenklasse ist durch die Wechselbeziehungen zwischen objektorientierter und tätigkeitsorientierter Strukturierung

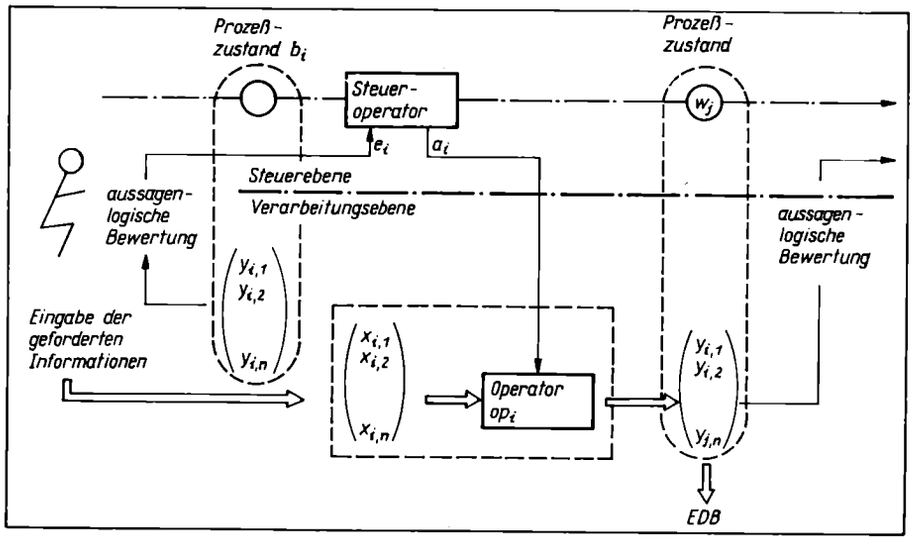


Bild 1. Wechselbeziehungen zwischen Prozeßsteuerebene und Verarbeitungsebene

geprägt, die im Prinzip im Bild 2 dargestellt sind. Die Funktion jedes Moduls ist damit durch Objekthierarchiekomponente und Prozeßhierarchiekomponente festgelegt. Jedem Knoten der Objekthierarchie werden genau die Informationen Y_i als Menge zugeordnet, die durch den äquivalenten Operator Op_i als Komponente der Prozeßhierarchie zu erzeugen sind. Alle so gebildeten Mengen müssen untereinander disjunkt sein. Mit der Zuordnung der erforderlichen Eingangsinformationen X_i, die nur auf der Grundlage der bekannten fachspezifischen Sachverhalte erfolgen kann, ist dann der Modul entsprechend der Gleichung

$$Y_i = Op_i(X_i) \tag{1}$$

eindeutig definiert. Weitere Aspekte der Modularisierung sind Zerlegung und Zusammenfassung der auf diese Weise gebildeten Module. Module, die komplexe Objekte — wie beispielsweise eine Schaltanlage — betreffen, müssen ggf. weiter zerlegt werden. Dagegen können Module, die einen nur geringen Umfang annehmen, zu einem komplexen Modul zusammengefaßt werden. Dieser Fall liegt beispielsweise bei der Dimensionierung von Abnehmeranschlüssen vor, bei denen sich Berechnung und Bewertung auf die Ermittlung von Schmelzzeit der Sicherung und Auslösezeit des Bimetalls und deren Vergleich mit der Anlaufzeit des Aggregates beschränken.

1.3. Entwicklung der Prozeßstruktur

Die Entwicklung der Prozeßstruktur enthält die Festlegung der logischen Folge der Moduln (Operatoren), in der entsprechend der Theorie der Prozeßablaufgraphen nach Abschn. 1.1. sowohl die Folgen der Knoten mit akzeptierten Ergebnissen als auch die Folgen der Knoten mit nicht akzeptierten Ergebnissen berücksichtigt werden müssen. Es wird hierbei von den Durchschnittsbildungen der Menge Y_i des Operators Op_i und der Menge X_j des Operators Op_j ausgegangen, wobei Op_i und Op_j einer Hierarchieebene des Prozesses angehören müssen. Ist beispielsweise die Bedingung $Y_i \cap X_j \neq \emptyset$ erfüllt, so sind Op_i und Pp_j koppelbar, wobei die Relation Op_j „folgt auf" Op_i realisiert wird. Damit entsteht eine objektiv begründete Softwarestruktur, die zunächst einen statischen Charakter hat. Sie besteht also unabhängig von der einzelnen Aktivierung der Operatoren, deren konkrete Folge mit Wiederholungen erst den konkreten Aufgabenlösungsprozeß ergibt. Ein weiterer bedeutsamer Aspekt bei der Entwicklung der Prozeßstruktur besteht in der Festlegung der Kanten bei der Ergebnisbewertung, die einer Nichtakzeptanz des Ergebnisses durch den Nutzer entspricht sowie der Festlegung von Entscheidungen mit Hilfe des D-Knotens. Die Nichtakzeptanz von Ergebnissen hat Rückführungen im Prozeß zur Konsequenz, die zu solchen Moduln führen, die eine Änderung von Eingangsinformationen X_i ermöglichen oder gezielte Fehlerauswertungen durchführen. Die hierzu erforderliche konkrete Struktur muß in Abhängigkeit des konkreten Prozeßinhalts festgelegt werden. Eine Kette von D-Knoten wird als Menü realisiert. Damit ist einerseits eine Spezifizierung von nicht akzeptierten Ergebnissen als auch ein Entscheidungsfeld (z.B. für die Wahl ausgewählter Moduln) für den Nutzer definierbar.

Bild 4 zeigt hierzu den Prozeßablaufgraphen für die Projektierung von Schaltanlagen im Prinzip. Der Prozeß besteht aus den Teilprozessen „Strukturentwurf", „Auswahl von Einspeisung, Abnehmeranschluß und Sammelschiene", „Auswahl des Informationsteils" und „Bestückung der Schaltanlage". Es ist deutlich, daß bei

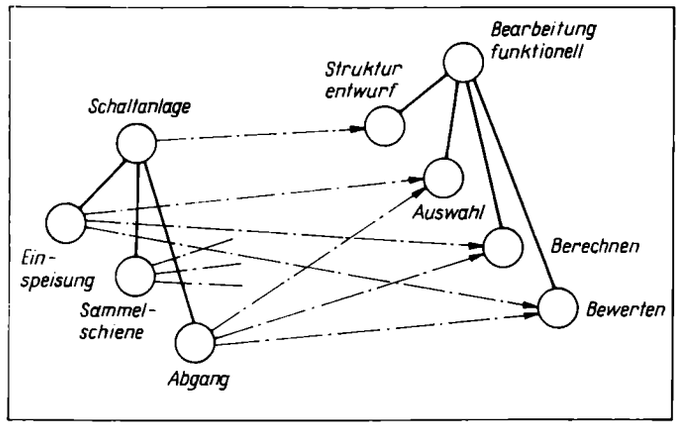


Bild 2. Abbildung der Objekthierarchie auf die Prozeßhierarchie

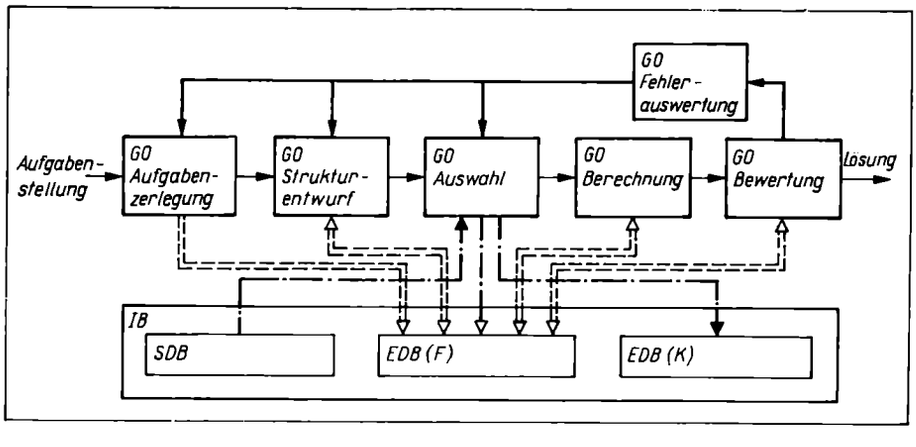


Bild 3. Kopplung der allgemeinen Operatoren in interaktiven Prozessen

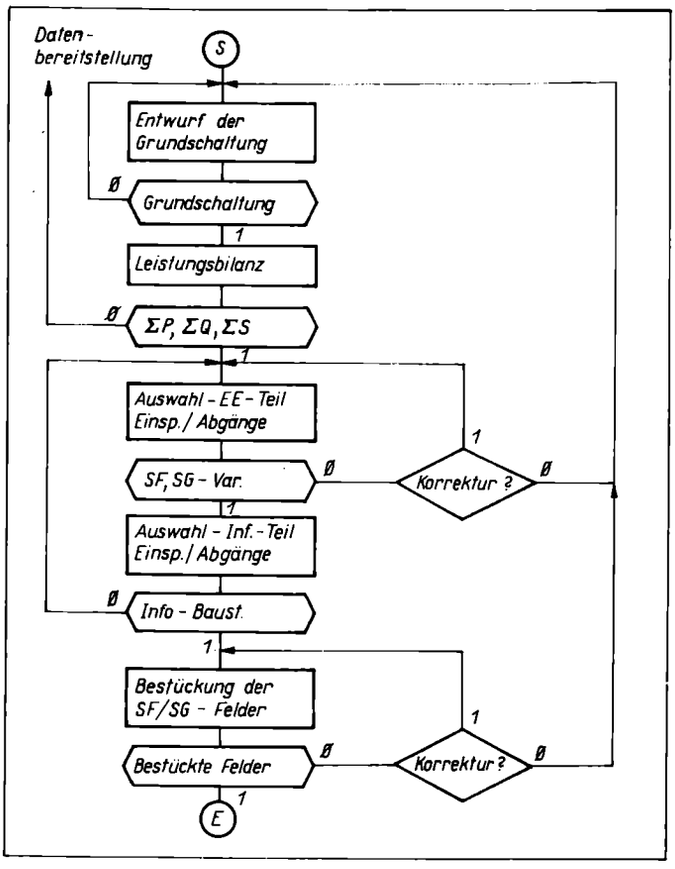


Bild 4. Prozeßablaufgraph für den Prozeß „Schaltanlagenprojektierung" (prinzipiell)

Nichtakzeptanz von Ergebnissen der Nutzer an die Stellen des Prozesses zurückgeführt wird, an denen eine Änderung der Informationen möglich ist, die das beurteilte Ergebnis bedingen.

2. Verfahrensmäßige Realisierung

Für den Entwurf von CAD-Prozessen auf der Grundlage der Prozeßablaufgraphen wurde das Softwaretool ESIP (Entwurf und Simulation interaktiver Prozesse) entwickelt, in dem wesentliche Grundfunktionen realisiert sind:

— Editor: In diesem Arbeitsmodus werden entsprechend der Theorie der Prozeßablaufgraphen Knoten und Kanten definiert und für Änderungen ggf. gelöscht und damit der Prozeßablaufgraph systematisch aufgebaut. Bei der Arbeit des Entwicklers wird die dem PAG zugrunde liegende Syntax simultan überwacht. Hierzu gehört die Überprüfung der zulässigen Knoten- und Kantentypen sowie die Überprüfung des Durchschnitts der Informationsmengen Y_i und Y_j, wenn der Operator Op_j auf den Operator Op_i folgen soll. Auf dem Titelbild ist der Bildschirminhalt für die Definition eines Operationsknotens gezeigt.

— Liste: Die Funktion „Liste" realisiert die Ausgabe der Kantenliste, in der für die definierten 1- und Ø-Kanten der jeweilige Folgeknoten angegeben wird. Offene Kanten werden durch „offen" gekennzeichnet (s. Titelbild).

— Simulation: Mit Hilfe dieser Funktion wird der entworfene Prozeß simuliert, ohne daß hierzu physische Programm-Moduln erforderlich sind. Der PAG wird dem Entwickler Schritt für Schritt (d.h. Knoten für Knoten) vorgeführt und es kann hierbei über weitere Entwicklungsschritte oder Änderungen entschieden werden.

— Prozeß: Die Funktion „Prozeß" realisiert die Steuerebene für den entwickelten interaktiven Arbeitsprozeß, indem der entworfene PAG interpretativ verarbeitet wird. Die aus Entscheidungsknoten aufgebauten Ketten werden in Menüs umgeformt und die den Operationsknoten entsprechenden Programm-Moduln, die als .exe- bzw. .com-Files vorliegen müssen, an den entsprechenden Stellen gestartet. So ergibt sich der reale Prozeßablauf, wie er in der Simulation erhalten wurde. Das System ESIP existiert gegenwärtig in den Versionen 1.03 (Grundversion Turbo-Pascal 3) und 1.04 (Grundversion Turbo-Pascal 4) für das Betriebssystem MS-DOS bzw. DCP. Das Nutzerinterface ist in beiden Versionen in Windowtechnik ausgeführt und benutzt die Begriffe der PAG-Syntax, wodurch die Verwendung einer speziellen Eingabesprache umgangen wird.

Computergestützte Freileitungsplanung unter dem Aspekt der Sichtbarkeit

M. Groß; H.-J. Koglin, Saarbrücken, BRD

Vortrag zur Wissenschaftlichen Konferenz 1989 der TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen

Die Errichtung neuer Hochspannungsfreileitungen ist für die Energieversorgungsunternehmen in den letzten Jahren zunehmend schwieriger geworden. Wachsendes Umweltbewußtsein unter der Bevölkerung und der immer deutlicher zu hörende Ruf nach Verkabelung verunsichern auch die Genehmigungsbehörden. Dabei werden wirtschaftliche Argumente immer mehr außer acht gelassen. Aus diesen Gründen ist man bei der Planung und Genehmigung der Trassenführung bestrebt, den optischen Eindruck der Freileitung in der Landschaft möglichst gering zu halten. Aus Mangel an einem objektiven ingenieurmäßigen Verfahren zur quantitativen Erfassung der Sichtbarkeit der Trasse mußten die Entscheidungen bisher anhand subjektiver qualitativer Kriterien erfolgen.

Ziel des Forschungsprojektes ist es, zwischen den Antipoden „teures, aber unsichtbares Kabel" und „billige, aber auffällige Freileitung" einen Kompromiß zu finden, der aufgrund objektiver Kriterien ermittelt wird und deshalb eine computergestützte Bearbeitung ermöglicht. Gesucht wird eine (nicht allzu teure) Freileitung, die unter verschiedenen Alternativen eine möglichst geringe Auffälligkeit im Gelände aufweist. Dabei werden folgende zwei Teilziele verfolgt:

— Die realistische perspektivische Darstellung von Freileitungen im Gelände auf einem Farbgrafikbildschirm mit Hilfe von problemspezifischen Grafikalgorithmen.

Dipl.-Ing. *Markus Groß* ist wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Energieversorgung der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, BRD.
Prof. Dr.-Ing. *Hans-Jürgen Koglin* ist Vizepräsident für Forschung und Ordinarius des Lehrstuhles für Energieversorgung der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, BRD.

3. Zusammenfassung

Gegenstand der Prozeßablaufgraphen ist die Entwicklung und Notierung interaktiver Prozesse, die für rechnerunterstützte Arbeitsweisen im TEVO-Bereich erforderlich sind. Ein Prozeßablaufgraph ist ein knoten- und kantenbewerteter gerichteter Graph, der durch eine definierte Syntax ausgezeichnet ist. Im Gegensatz zur Entwicklung einzelner Module, für die mit Konsequenz die Prinzipien der strukturierten Programmierung anzuwenden sind, insbesondere das Prinzip der Linearität, werden im Prozeßablauf die bei der Ingenieurarbeit erforderlichen iterativen Rücksprünge im Arbeitsprozeß durch die Bewertung erhaltener Ergebnisse und Teilergebnisse realisiert. Damit läßt sich die Ablauflogik für die Prozeßsteuerebene in eindeutiger Weise beschreiben. Die definierte Syntax des Prozeßablaufgraphen ermöglichte die Entwicklung eines Softwaretools, mit dem interaktive Prozesse rechnerunterstützt entwickelt, simuliert und gesteuert werden können. Das Nutzerinterface, insbesondere in der Ebene des Editors, verwendet die Begriffe der PAG-Syntax, wodurch eine sehr einfache und unkomplizierte Änderung von Prozeßabläufen durch Änderung der Folge von Moduln ermöglicht wird.

Literatur

[1] *Gerlach, O.:* Untersuchungen zur Simulation des Projektierungsprozesses auf der Basis von Petri-Netzen. Diplomarbeit SEA, TH Leipzig 1986
[2] *Heinze, D.; Butz, U.; Kutscher, R.; Krause, G.:* Einheitliches Modularkonzept des CAD-Systems „Projektierung von Elektroenergieverteilungsanlagen". 33. IWK der TH Ilmenau, Tagungsmaterial, H. 1, S. 127
[3] *Butz, U.; Gerlach, O.; Heinze, D.:* Modellierung von rechnerunterstützten Projektierungsprozessen mittels Petri-Netzen. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 12, S. 446
[4] *Heinze, D.; Butz, U.; Kutscher, R.:* Zur Gestaltung des Prozeßablaufes in CAD-Systemen für die Projektierung von Verteilungsanlagen. ELEKTRIE, Berlin 39 (1985) 12, S. 447
[5] *Bujko, J.; Tuzinkiewicz, L.:* Regeln der automatischen Generierung einer Projektierungsstrategie in rechnerunterstützten Systemen. ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 11, S. 408

EA 5988

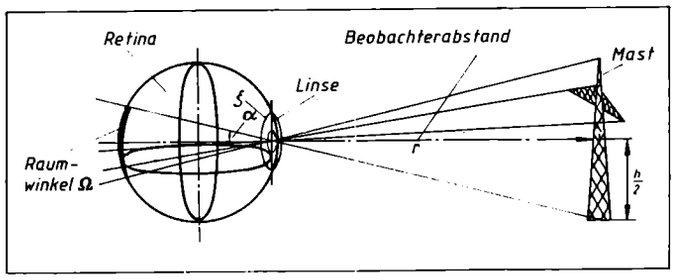


Bild 1
Projektion eines Bildes auf die Retina

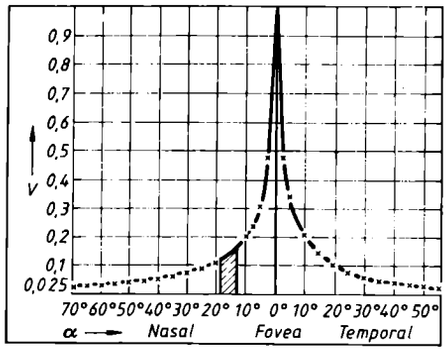


Bild 2
Sehschärfe V in Abhängigkeit vom Sehwinkel α gemäß *Schober* [4]

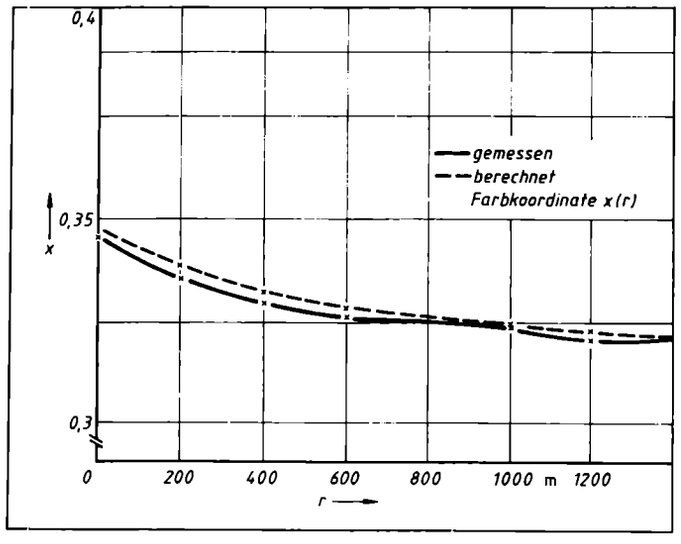


Bild 3
Gemessene und berechnete Werte für den Farbort $x\,(r)$ in verschiedenen Entfernungen für ein Testobjekt (grüne Wiese)

— Die quantitative Erfassung der Sichtbarkeit der Freileitung durch einen neuen Bildverarbeitungsalgorithmus.

1. Klassifizierung der Einflußfaktoren auf die Sichtbarkeit eines Freileitungsmastes

Zunächst ist es notwendig, die relevanten physiologischen und physikalischen Einflußfaktoren auf die optische Auffälligkeit zu ermitteln und hinsichtlich ihrer Bedeutung zu klassifizieren. Psychologische Faktoren, wie zum Beispiel Form- und Farbempfinden des Betrachters, oder ästhetische Gesichtspunkte sind subjektiv und können daher nicht Gegenstand eines objektiven Verfahrens sein.

Tafel 1
Meßergebnisse für Farborte ausgewählter Objekte, bereinigt um die Wetterverhältnisse in der BRD

Objekt	Y	x	y
Himmel	7183,8	0,312	0,321
Mischwald	269	0,336	0,394
Mast grau	558	0,313	0,324
Mast grün	627	0,314	0,358
Wiese	543	0,366	0,461
Acker (trocken)	645	0,375	0,364
Haus 1	4497	0,320	0,328
Haus 2	1479	0,340	0,363
Straße	805	0,324	0,331

1.1. Projektion eines Bildes auf die Retina

Bild 1 zeigt den Strahlengang bei der Projektion eines aus der Entfernung r gesehenen Mastes auf die Retinaoberfläche. Die Größe der dabei verdeckten Netzhautfläche kann durch den Raumwinkel beschrieben werden. In größerer Entfernung r zum Mast gilt dann der Zusammenhang:

$$\Omega \sim 1/r^2. \tag{1}$$

Der Raumwinkel Ω kann also zur Bewertung der optischen Auffälligkeit mit herangezogen werden.

1.2. Sehschärfe des menschlichen Auges

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Tatsache, daß die Sehschärfe V beim Tagessehen nicht an allen Orten der Retina gleich ist, sondern vielmehr im Netzhautzentrum ihr Maximum hat und zur Peripherie hin abnimmt. Bild 2 zeigt den Verlauf von V in Abhängigkeit vom Sehwinkel α. Diese Kurve kann als rotationssymmetrisch angenommen und in den beiden Kugelkoordinaten α und ξ (vgl. Bild 1) wie folgt approximiert werden:

$$V\,(\alpha, \xi)\,a \approx + \frac{b}{\alpha + c}. \tag{2}$$

Deshalb muß für jeden auf der Retina verdeckten Raumwinkelbereich $\mathrm{d}\Omega$ der entsprechende Wert der Sehschärfe V mitbewertet werden. Das gilt jedoch nur für einen starren Blick des Beobachters; tastet dieser den Mast mit den Augen ab, so spricht man gemäß *Korn* [5] von sogenannten Sakkaden, die sich jedoch jeder funktionalen Beschreibung entziehen.

1.3. Farbdifferenzen zum Hintergrund und Optik der Atmosphäre

Nach den Gesetzen der höheren Farbmetrik (*Richter* [6]) kann der farbliche Unterschied zwischen einem Objekt und seinem Hintergrund mit sogenannten Farbabstandsformeln erfaßt werden. Ausgangspunkt dieser Überlegungen ist die Tatsache, daß jede Farbe durch drei Maßzahlen beschrieben werden kann. Üblicherweise geschieht das im Yxy-Farbenraum, wobei Y die Objektleuchtdichte darstellt und (x, y) die Farbe charakterisieren.
Mit

(Y_O, x_O, y_O):	Farbort des Objektes (monochrom)
(Y_H, x_H, y_H):	Farbort des Hintergrundes (monochrom)
(Y_{Hi}, x_{Hi}, y_{Hi}):	Farbort des Himmels (monochrom)

und der Einführung eines Polarkoordinatensystems, das den Beobachterabstand vom Objektzentrum in den Koordinaten (r, φ) beschreibt, ist der relative Kontrast $C\,(r, \varphi)$ gemäß *Groß/Koglin* [2]

Bild 4. S'' bei einer schwarzen Kugel für verschiedene Kugelradien

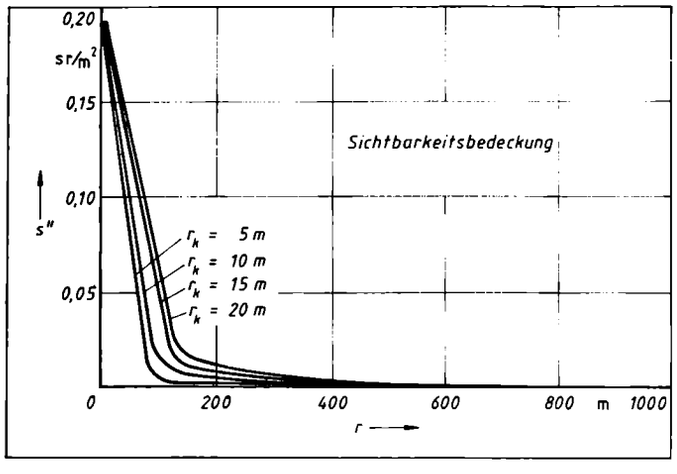
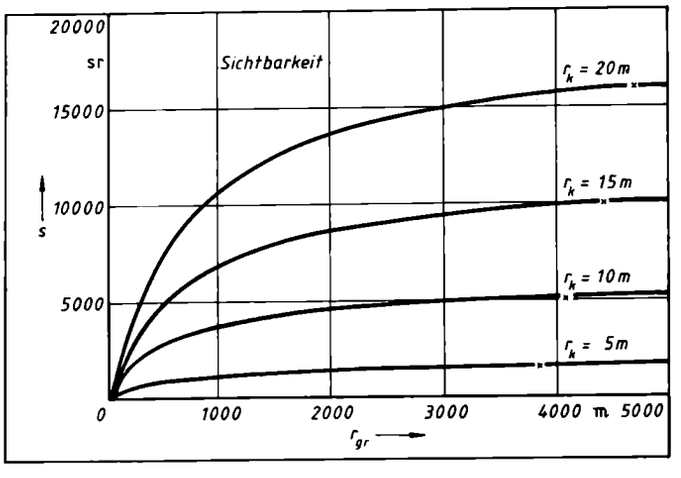


Bild 5. S bei einer schwarzen Kugel für verschiedene Kugelradien



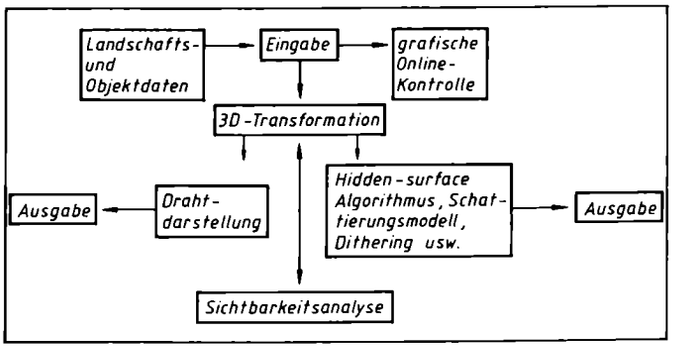


Bild 6. Aufbau des Softwarepakets „3DOG"

wie folgt definiert:

$$C(r,\varphi) = \frac{Y_H \cdot e^{-Zr_H} + y_{Hi}(1-e^{-Zr_H}) - Y_O \cdot e^{-Zr_O} - Y_{Hi}(1-e^{-Zr_O})}{(Y_H - Y_{Hi}) \cdot e^{-Zr_H} + Y_{Hi}} . \quad (3)$$

Dabei wird die exponentielle Kontrastdämpfung durch die Atmosphäre gemäß *Dietze* [8] berücksichtigt und ein Mittelwert von $Z = 0{,}3/\mathrm{km}$ für die BRD angenommen. Ist das Objekt heller als der Hintergrund, so muß in (3) entsprechend auf das Objekt bezogen werden. Weiterhin verschieben sich die beiden Farbkoordinaten x und y mit zunehmender Beobachterentfernung r gemäß (4) und (5) zu denen des Himmels x_{Hi} und y_{Hi} und können gemäß *Groß/Koglin* [3] durch folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$x(r) = x \cdot e^{-Zr} + x_{Hi}(1-e^{-Zr}), \quad (4)$$

$$y(r) = y \cdot e^{-Zr} + y_{Hi}(1-e^{-Zr}). \quad (5)$$

Eine meßtechnische Verifizierung des aufgestellten Zusammenhangs zeigt Bild 3. Hier wurden die Farborte eines Testobjekts bei Nebel und geringer Sichtweite Z für verschiedene Entfernungen r gemessen. Die Meßwerte für $x(r)$ sind den nach (4) berechneten gegenübergestellt. Die geringen Ungenauigkeiten rühren einerseits aus der nur näherungsweisen Bestimmung von Z und andererseits aus Inhomogenitäten in der Atmosphäre. Dabei ist die Unterdrückung des Nullpunktes der y-Achse im Bild 3 zu beachten. Für die Farbdifferenz $\Delta E(r)$ zum Hintergrund ergibt sich dann:

$$\Delta E(r) = \sqrt{C(r)^2 + [x_O(r) - x_H]^2 + [Y_O(r) - Y_H]^2} . \quad (6)$$

Man hat jedoch durch Versuche [6] festgestellt, daß die berechneten Werte für ΔE oft nicht mit den empfundenen Werten übereinstimmen. Daher ist es sinnvoll, den von der CIE 1976 vorgeschlagenen Yuv-Farbenraum [7] zu wählen, Dann gilt:

$$\Delta E(r) = \sqrt{C(r)^2 + \Delta u(r)^2 + \Delta v(r)^2} , \quad (7)$$

wobei u und v durch einfache Transformationen aus x und y gewonnen werden. Tafel 1 zeigt die Farborte einiger Objekte. Die Meßwerte sind statistisch um die Wetterverhältnisse in der BRD bereinigt.

1.4. Problematik des Freileitungsmastes

Die bisherigen Aussagen gelten für massive, monochrome Objekte. Bei einem Mast ergeben sich jedoch durch die vorhandenen Stahlstreben sehr viele Kontrastübergänge, deren exakte Berechnung mit den später erläuterten Verfahren zu kompliziert wäre. Eine mögliche Lösung dieses Problems ist die Adaption des Mastfarbortes. Dabei wird der Mast als ein massives Objekt betrachtet, dessen Farbort entsprechend dem Verhältnis vb aus tatsächlich verdeckter Retinafläche und Retinafläche in der Kontur gegenüber dem Hintergrund adaptiert ist. Das ist besonders für größere Entfernungen einleuchtend, wenn die Einzelstreben aufgrund des Auflösungsvermögens des Auges [5] nicht mehr erkannt werden und der Mast als quasi einheitliche Graufläche erscheint.

2. Mathematisches Verfahren

Ausgehend von diesen Vorüberlegungen kann nun ein Berechnungsverfahren für die Sichtbarkeit eines Objekts aufgestellt werden. Dazu bedarf es jedoch zunächst der Definition folgender neu eingeführter Größen:

Die *Sichtbarkeitsbedeckung* $S''(r,\varphi)$ (Einheit $\mathrm{sr/m^2}$) ist ein Maß für den optischen Eindruck, den ein Objekt an einem bestimmten

Bild 7
Vereinfachtes Modell eines 110-kV-Freileitungsmastes (Leiterseile und Isolatoren nicht berücksichtigt)

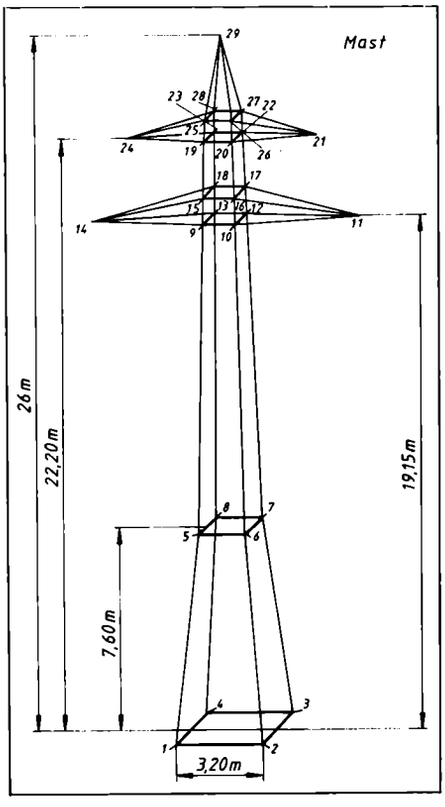


Bild 8
Verwendetes Polarkoordinatensystem

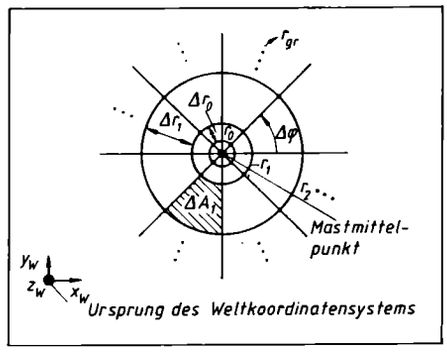
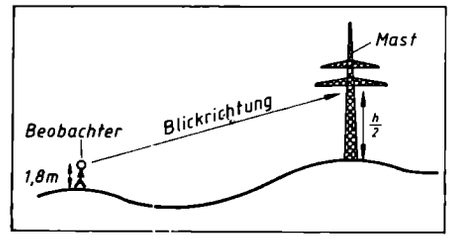


Bild 9
Zur Blickrichtung des Beobachters



Beobachterstandpunkt hinterläßt. Gemäß den Faktoren aus Abschn. 1. muß sie als Integral über den vom Objekt auf der Netzhaut eingenommenen Raumwinkelbereich Ω, bewertet mit der Sehschärfe V und der Farbdifferenz zum Hintergrund ΔE, berechnet werden:

$$S''(r,\varphi) = \frac{1}{d} \int_N V(\alpha,\xi)\, \Delta E(r,\varphi)\, \mathrm{d}\Omega , \quad (8)$$

$d = 1\ \mathrm{m^2}$.

Die *Sichtbarkeit* S (Einheit sr) beschreibt den gesamten optischen Eindruck eines Objekts im Gelände. Dazu muß über alle möglichen Beobachterstandpunkte, gewichtet mit den ihnen zugeordneten Flächenelementen $\mathrm{d}A = r\,\mathrm{d}r\,\mathrm{d}\varphi$, integriert werden:

$$S = \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_{gr}} S''(r,\varphi)\, r\, \mathrm{d}r\, \mathrm{d}\varphi . \quad (9)$$

Dabei wird ab einer Untergrenze r_0 (im allgemeinen der Mindestabstand des Beobachters zum Objekt) und bis zu einer Obergrenze r_{gr} integriert. Weil das Integral aus (9) für $r_{gr} \to \infty$ konvergiert, genügt es, bis zu einer 95-%-Obergrenze $r_{gr\,95}$ zu integrieren, mit

$$S(r_{gr\,95}) = 0{,}95\, S(r_{gr} \to \infty) . \quad (10)$$

2.1. Analytische Beispielrechnungen

Die Gln. (8) und (9) können für sehr einfache Objekte aufgestellt und ausgewertet werden. Bilder 4 und 5 zeigen die Sichtbarkeitsbedeckung $S''(r)$ und die Sichtbarkeit $S(r_{gr})$ bei einer schwarzen Kugel vor weißem Hintergrund. Parameter ist der Kugelradius r_k. Mit $\Delta E = e^{-Zr}$ und $Z = 0{,}3/\mathrm{km}$ ergibt sich:

$$S'' = \int_0^{2\pi} \int_0^{\arcsin(r_k/r)} \left[a + \frac{b}{\alpha + c}\right] e^{-Zr} \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha \cdot d\xi . \qquad (11)$$

Wie zu erwarten, nimmt S'' mit wachsender Entfernung ab, d.h., der optische Eindruck wird geringer, S dagegen konvergiert mit wachsender Integrationsobergrenze. Es genügt also eine endliche Umgebung des Objekts zur Sichtbarkeitsberechnung.

3. Rechnergestütztes Simulationsverfahren

Ausgehend von diesen theoretischen Vorüberlegungen war es möglich, ein Softwarepaket („3DOG" = **3**-dimensionale **D**arstellung von **O**bjekten im **G**elände) zu entwickeln, das aus Daten topografischer Karten das Gelände mit entsprechendem Bewuchs, Bebauung und geplanter Trasse 3-dimensional rekonstruiert und Sichtbarkeitsanalysen sowie grafische Ausgaben durchführt. Dieses Paket wird im folgenden näher erläutert.

3.1. Beschreibung des Softwarepaketes „3DOG"

Bild 6 zeigt den Aufbau des Softwarepaketes „3DOG" gemäß *Groß/Koglin* [1], das aus drei wesentlichen Teilen besteht:

1. Eingabeteil, der die digitale Erfassung des Geländes und der übrigen Szenerie ermöglicht.
2. 3D-Teil, der die Szenerie 3-dimensional rekonstruiert und transformiert.
3. Teil zur Sichtbarkeitsanalyse, der ausgehend von rekonstruierten Modellen die quantitative Erfassung des optischen Eindrucks der Freileitung übernimmt.

3.1.1. Eingabe und Modellierung der Szenerie

Zur 3-dimensionalen Rekonstruktion der Szene müssen zunächst alle erforderlichen Daten in den Rechner eingegeben werden. Das erfolgt über einen Digitizer durch Abtasten von Höhenlinien aus topografischen Karten. Weiterhin müssen Symbole für Bebauung, Masten und Bewuchs gesetzt werden. Diese Symbole entnimmt der Anwender wahlweise entsprechenden Bibliotheken oder definiert sie selber frei. Das Ergebnis einer solchen Eingabe ist ein 2-dimensionales Abbild des Geländes wie im Bild 11 dargestellt. Der Koordinatenursprung des Weltkoordinatensystems liegt in der linken unteren Kartenecke. Zur Eingabe größerer Bereiche wird die Karte segmentiert. Weiterhin können für dasselbe Gelände verschiedene Trassenvarianten zur späteren Beurteilung zugrunde gelegt werden.

3.1.2. Erzeugen von Gelände- und Objektmodellen

Die Umwandlung der eingegebenen Höhenlinieninformation in ein äquidistantes Geländeraster erfolgt mit Hilfe gewichteter Interpolation. Dabei werden die Höhenlinien gemäß ihres Abstandes zum entsprechenden Rasterpunkt gewichtet und so dessen Höhe berechnet.

Die Höhenkoordinate eines Rasterpunktes ergibt sich dann aus den entlang den Rasterlinien nächstgelegenen Höhenlinien. Für eine detaillierte Darstellung sei auf [3] verwiesen. Das so interpolierte Geländeraster wird nun im 3D-Teil weiterverarbeitet. Jeweils vier Rasterpunkte bilden dann ein Polygon.

In gleicher Weise wird auch die Information über 3-dimensionale Modelle und zusammengehörige Polygone von Masten, Bewuchs, Bebauung usw. aus entsprechenden Bibliotheken entnommen und daraus das Objekt im Programm rekonstruiert. Seine Position in der Landschaft ergibt sich aus den Eingabedaten und einer Höheninterpolation der umgebenden Rasterpunkte. Die das Objekt beschreibende Datei enthält folgende Information:

a) Eckpunkte des Objekts in Objektkoordinaten
b) generierende Polygone über Pointer auf die entsprechenden Eckpunkte
c) R-G-B-Werte für die Farben der Polygone
d) Y-x-y-Wert für den Farbort des Objekts (vgl. Tafel 1)

Bild 7 zeigt das vereinfachte Modell eines 110-kV-Freileitungsmastes.

3.1.3. Wahl von Beobachterstandpunkt und Blickrichtung

Zur subjektiven Ermittlung der optischen Umweltwirksamkeit der geplanten Trasse hat der Anwender nun die Möglichkeit, durch die Wahl von Beobachterstandpunkt (BP) und Blickrichtung (BR) bezüglich des Kartenursprungs ein realistisches Bild der modellierten Szenerie zu erzeugen. Das Programm simuliert einen fiktiven Beobachter an der eingegebenen Stelle in der Landschaft.

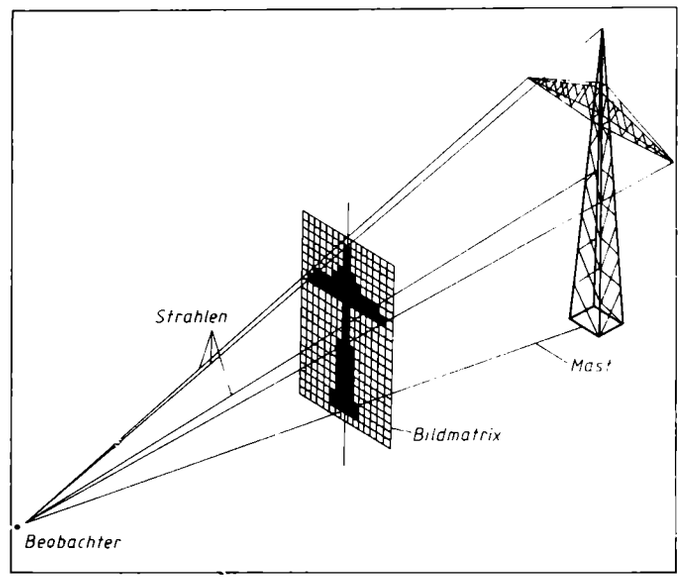


Bild 10. Aufbau der Bildmatrix bei geringer Auflösung

3.2. Arbeitsweise des Analysealgorithmus

Kern des erwähnten Programmpaketes ist die Sichtbarkeitsanalyse, die ausgehend von der 3-dimensionalen Modellierung der Szenerie die Berechnung der Sichtbarkeitsbedeckung S'' sowie der Sichtbarkeit S für jedes ausgewählte Objekt im Gelände übernimmt. Damit lassen sich dann die Maste hinsichtlich ihrer optischen Auffälligkeit mit anderen Objekten, z.B. Gebäuden, vergleichen. Die drei Hauptschritte bei der Sichtbarkeitsanalyse, die Simulation von Beobachtern, der Bildaufbau und die eigentliche Bildanalyse werden im folgenden beschrieben.

3.2.1. Simulation von Beobachtern

Nach (9) ergibt sich die Sichtbarkeit S aus der Integration von S'' über alle Beobachterstandpunkte in einem Polarkoordinatensystem. Dazu wird zunächst ein ringförmiges Netz (n) um den zu analysierenden Mast gemäß Bild 8 aufgebaut. Es wird generiert nach der Vorschrift:

$$(r_n + \Delta r_n/2)\,\Delta\Phi = \Delta r_n . \qquad (12)$$

Die Flächenelemente wachsen dabei exponentiell, was den Vorteil der hohen Genauigkeit im Nahbereich bei vertretbarer Rechenzeit mit sich bringt. Innerhalb eines jeden Flächenelementes ΔAi wird nun mit Hilfe eines Zufallsgenerators ein Beobachterstandpunkt (i) bestimmt. Da sie nicht korrelieren dürfen, müssen sie zufällig in den Rastern verteilt sein.

3.2.2. Bildaufbau

Von jedem dieser Beobachterstandpunkte (i) aus wird der Mast, wie im Bild 9 dargestellt, betrachtet. Die Blickrichtung weist dabei zur Mastmitte hin. Das vom Beobachter gesehene Bild des Mastes und seiner Umgebung befindet sich in einer Ecke senkrecht zur Blickrichtung im Abstand von 1 m. Der Aufbau ist im Bild 10 zu erkennen. Dazu wird bei gegebener steuerbarer Auflösung durch jedes Pixel ein Strahl in die aus Polygonen bestehende Szene gelegt, die Schnittpunkte mit den Polygonflächen markiert und der Pixelfarbort auf den des dem Beobachter nächsten Schnittpunktes gesetzt. Allerdings wird nur die für die Analyse interessante direkte Umgebung des Mastes betrachtet.

3.2.3. Bildanalyse

Die Analyse des so aufgebauten Bildes und damit die Erfassung des optischen Eindrucks des Mastes im Gelände erfolgt jetzt durch zeilenweises Abtasten der Bildmatrix unter Berücksichtigung der vorher erwähnten Einflußfaktoren. Sie kann dabei als Netzhaut des fiktiven Beobachters interpretiert werden. Sämtliche Pixel haben einen charakteristischen Farbort, der dem darzustellenden Objekt oder dem Hintergrund entspricht und den realen Messungen entnommen ist. Trifft man beim Abtasten einer Zeile auf ein Mastpixel, so wird zunächst die Farbdifferenz ΔE_{k1} zum vorherigen

Pixel berechnet. Jetzt wird jeder Mastpixel mit dem ihm eigenen Wert der Visusfunktion $V(k, j)$ und dem entsprechenden Raumwinkel $N(k, j)$ bewertet und bei erneutem Übergang von Mastpixel zu Umgebungspixel die Farbdifferenz ΔE_{k2} berechnet. Die für die Zeile maßgebliche Zeilenfarbdifferenz ΔE_j ist das arithmetische Mittel gemäß (13).

$$\Delta E_j(r_i, \varphi_i) = \frac{\Delta E_{k1}(r_i, \varphi_i) + \Delta E_{k2}(r_i, \varphi_i)}{2}. \quad (13)$$

Die Sichtbarkeitsbedeckung S'' von einem ausgewählten Beobachterstandpunkt ergibt sich dann nach (14) zu

$$S_i'' = \sum_j \Delta E_j(r_i, \varphi_i) \sum_k V(k, j)\, N(k, j), \quad (14)$$

die Sichtbarkeit S aus der Summation über alle Beobachterstandpunkte i, bewertet mit der Beobachterfläche ΔAi nach (15).

$$S = \sum_i S_i'' \, \Delta Ai. \quad (15)$$

Mit diesem Verfahren läßt sich durch Aufsummieren der Sichtbarkeiten der einzelnen Maste jede geplante Trasse hinsichtlich ihrer optischen Auffälligkeit im Gelände bewerten. Verschiedene Varianten können so verglichen werden. Dabei berücksichtigt der Algorithmus auch die Abschattung einzelner Maste durch andere.

3.3. Beispieldarstellungen und -analysen

Bild 11 zeigt die digitalisierte topografische Karte eines Beispielgeländes. Die Pfeile markieren die Beobachterstandpunkte und Blickrichtungen für die Bilder 12, 13 und 14 (s. 2. u. 3. US.) die 3-dimensionale Rekonstruktionen der Szenerie zeigen. Unter jedem Bild sind die errechneten Sichtbarkeitsbedeckungen für alle im Bild vorhandenen Maste angegeben. Die Numerierung der Maste erfolgte von links nach rechts. Obwohl Farben und Kontraste der Fotos nicht mit den Farborten aus Tafel 1 übereinstimmen und die atmosphärische Dämpfung nicht wiedergegeben ist, läßt sich doch eine gute Übereinstimmung zwischen der empfundenen Auffälligkeit des Mastes und seiner Sichtbarkeitsbedeckung im Yxy-Farbenraum erkennen.

Literatur

[1] *Groß, M.; Koglin, H.-J.:* Sichtbarkeit von Freileitungen. Kompendium zum I.I.I-Forum am 4./5. 11. 87 in Saarbrücken, S. 235–240
[2] *Groß, M.; Koglin, H.-J.:* Representation of planned overhead lines – the optical impression on the landscape. IEEE Conference Publication No. 297, 1988
[3] *Groß, M.; Koglin, H.-J.:* Computergestützte Freileitungsplanung unter Berücksichtigung der Sichtbarkeit. Informatik Fachberichte, Band 184. Springer-Verlag 1988
[4] *Schober, H.:* Das Sehen. Leipzig: Fachbuchverlag 1960
[5] *Korn, A.:* Bildverarbeitung durch das visuelle System. Fachberichte Messen, Steuern, Regeln. Berlin: Springer-Verlag 1982
[6] *Richter, M.:* Einführung in die Farbmetrik, 2. Auflage. Berlin: de Gruyter Verlag 1981
[7] Deutsche Normen: DIN 5033, Teil 3, Farbmessung
[8] *Dietze, G.:* Einführung in die Optik der Atmosphäre. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1957, S. 211 ff

EA 5989

Kraftwerksdiagnostik mit Computer

Das frühzeitige Erkennen von Wälzlagerschäden ist der wesentliche Vorzug eines in die Praxis übergeleiteten Verfahrens. Ein interdisziplinäres Jugendforscherkollektiv aus dem VEB Kraftwerke Hagenwerder und der Technischen Hochschule Zittau entwickelte diese Neuerung. Ihr Kernstück ist ein mikrorechnergesteuertes, 4 kg wiegendes tragbares Schwingungsdiagnosegerät aus dem VEB Robotron-Meßelektronik Dresden. Im Zusammenspiel mit einem Personalcomputer lassen sich bei diesem Verfahren bis zu 100 Meßstellen speichern und so eine aktuelle Bewertung der Wälzlager vornehmen. Damit wird es möglich, für jede einzelne Anlage den Zustand und den Grad der Abnutzung von Wälzlagern zu erfassen. In den drei Teilkraftwerken Hagenwerder mit einer installierten Leistung von 1500 MW ist z. B. jährlich ein 10-kV-Hochspannungsmotor abzuschreiben, weil Wälzlagerschäden zu spät erkannt werden.

Gegenwärtig sind in den Kraftwerken Hagenwerder etwa 1500 Wälzlager für die technische Diagnostik erfaßt. Im Stammbetrieb des Petrolchemischen Kombinats Schwedt, das zu den ersten Nachnutzern dieses Verfahrens gehört, sind es 500 Antriebe. Außerdem existieren andere Nachnutzungen, wobei anstelle dieses tragbaren Schwingungsdiagnosegerätes eine stationäre Anordnung der Gerätetechnik tritt.

(ADN/EL)

EA 3013

Entscheidungsmodelle in Expertensystemen

G. Dittrich, Hoyerswerda

Vortrag zur Wissenschaftlichen Konferenz 1989 der TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen

Mit der weiteren Einführung von leistungsfähigen Computerarbeitsplätzen in den Betriebsabteilungen der Elt-Bereiche von Energiekombinaten, Kombinaten der chemischen Industrie und der Kohleveredlung steigen die Ansprüche an die durch die Computer zu erfüllenden Aufgaben. Während in der Vergangenheit selektive, abgegrenzte Probleme, z. B. Materialwirtschaft, Grundmitteldokumentation, Aufgaben der Instandhaltungsüberwachung und -abrechnung, Störungsstatistik, Personalprogramme oder Informationsaufgaben, rechnergestützt bearbeitet wurden, vollzieht sich gegenwärtig eine Entwicklung zur Integration von einzelnen Aufgaben in größere Komplexe und zu einer intelligenteren Verarbeitung der in Summe vorliegenden und gespeicherten Systemdaten. Zum Beispiel rückt heute eine zustandsbezogene Instandhaltung auf der Basis der Störerfassung, technischen Diagnoseergebnisse, Anzahl der Schalthandlungen, Belastung, der IH-Berichte usw. in greifbare Nähe.

Das Vermögen eines Computerarbeitsplatzes wird in Zukunft umfassen:

— Datensammlung, -aufbereitung und -verwaltung
— Bereitstellung von Netzplänen, Schaltbildern, Schaltzuständen (Grafiksystem)
— verschiedenartige Berechnungsmodelle
— Leiterinformation und Kontrollsystem
— Planungs-, Bewertungs- und Entscheidungsmodelle.

Die Planungs-, Bewertungs- und Entscheidungsmodelle stellen auf Grund der vergegenständlichten neuesten wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse und der erzielbaren volkswirtschaftlichen Effekte das Kernstück in Expertensystemen dar. Mit solchen Systemen kann ein hohes und einheitliches Bearbeitungsniveau innerhalb der Kombinate und darüber hinaus gesichert werden. Subjektive Einflüsse werden zurückgedrängt und die volkswirtschaftlichen Ressourcen gelangen nach objektiven Kriterien optimal zum Einsatz.

1. Anforderungen an Bewertungs- und Entscheidungsmodelle

Technische und ökonomische Entscheidungen werden täglich in allen Ebenen und Bereichen getroffen. Der bewußte, wissenschaftliche Entscheidungsablauf ist aber immer noch eine Ausnahme.

Allgemeiner Entscheidungsprozeß:

Aufgabenstellung
System-/Prozeßanalyse
Entscheidungsprozeß
Umsetzung in die Praxis.

Anforderungen an ein Entscheidungsmodell:

1. Es soll der subjektive Einfluß weitestgehend ausgeschlossen sein.
2. Die Entscheidung muß dokumentierbar und nachvollziehbar sein.
3. Es muß praktikabel sein.
4. Akzeptanz des Informationsmangels.

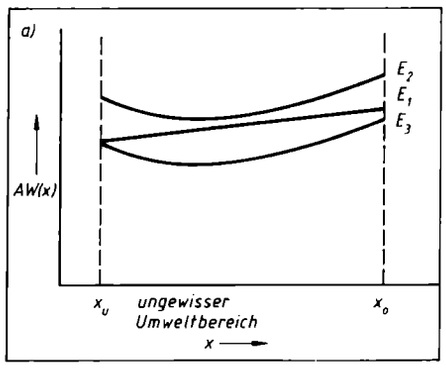
Der Informationsmangel ergibt sich aus unvermeidbaren Systemabhängigkeiten, der nur angenäherten objektiven Abbildung des Systems im Modell und aus der Unbestimmtheit von Systemgrößen einschließlich stochastischen Größen.

5. Berücksichtigung der gleichzeitigen Existenz mehrerer Entscheidungsziele (Entscheidungsmenge).

Nahezu jede Entscheidung ist mehrkriteriell, wobei die Ziele zueinander neutral sein können, miteinander kooperieren und/oder auch konkurrieren können.

6. Beachtung dynamischer Einflüsse.

Dr.-Ing. *Günther Dittrich* ist Hauptabteilungsleiter im VEB Gaskombinat „Fritz Selbmann" Schwarze Pumpe, Bereich Kraftwerke.



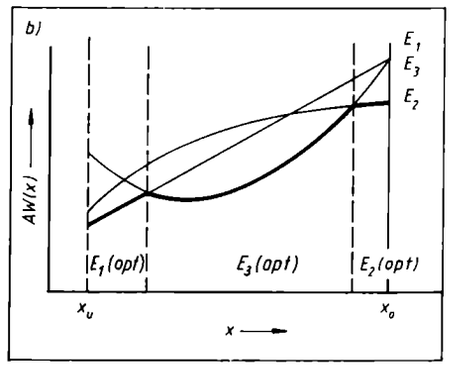


Bild 1. Entscheidung ohne bzw. mit Risiko bei einer unabhängig Veränderlichen und einem Entscheidungsziel

a) Entscheidung ohne Risiko; b) unsichere Entscheidungssituation

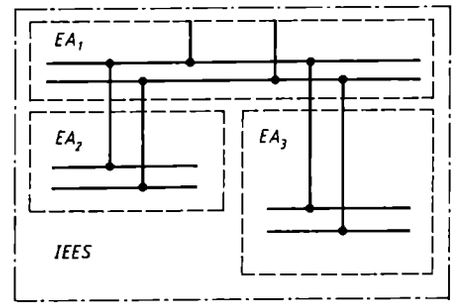


Bild 2. EA-Elektroenergieanlage

Als theoretische Grundlage der Entscheidungstheorie hat sich die Spieltheorie weitestgehend durchgesetzt. Eine technische Entscheidung bei Ungewißheit wird als Zwei-Personen-Nullsummen-Spiel aufgefaßt. Neben dem bekanntesten, dem Minimax-Kriterium, finden zahlreiche andere Kriterien praktische Anwendung. Aber auch der Einsatz der „Nash"-Strategie und der „Stackelberg"-Strategie ist denkbar.

Anspruchsvolle Entscheidungsmodelle werden über Sensibilitäts- bzw. Stabilitätsanalysen im Rechnerdialog ausgehend von einem Ausgangszustand oder vorgegebenen Alternativen in der Lage sein, nicht nur eine optimale Alternative oder Strategie aus einer Menge gegebener auszuwählen, sondern eine optimale Lösung zu entwickeln. Auf der Basis solcher Entscheidungsmodelle sind an der TH Zittau mehrere Arbeiten erfolgreich abgeschlossen und praxiswirksam umgesetzt worden. Ein mehrkriterielles Bewertungs- und Entscheidungsverfahren für ein industrielles Elektroenergiesystem wird nachfolgend vorgestellt, wobei die gebotene Kürze nur die Möglichkeit bietet, Interesse zu wecken.

2. Mehrkriterielles Entscheidungsverfahren für ein IEES

2.1. Systemdarstellung

Bei großen industriellen Energieversorgungssystemen (IEES) ist es zunächst notwendig, das IEES in überschaubare, mathematisch und gedanklich beherrschbare Untersysteme/Betrachtungseinheiten zu zerlegen, deren Unabhängigkeit von anderen Systemen weitestgehend gesichert ist. Bei dieser Dekomposition des Gesamtsystems wird zweckmäßigerweise so vorgegangen, daß innerhalb einer Betrachtungseinheit alle Netzelemente der gleichen Ausfallkosten-Unterbrechungsdauer-Funktion (AUF) gehorchen. Diese Betrachtungseinheiten und deren mögliche Ausbauvarianten (E-Strategien) werden mit Hilfe folgender Größen bewertet:

— Betriebskosten
— Investitionskosten
— Schadenskosten
— Ausfallkosten
— Personengefährdung.

Das Modell ist zur Bewertung von Strahlennetzen, Doppelstrahlennetzen, Ringnetzen und einfachen Maschennetzen geeignet. Redundanzen und automatische Umschalteinrichtungen sind berücksichtigt.

In die Ausfallkosten sind sieben verschiedene Doppelfehler mit teilweise sehr umfangreichen mathematischen Beziehungen integriert:

— Ausfall beider Teilnetze durch parallele Leitungsführung
— Doppelsammelschienenausfall
— Beeinflussung beider Netze durch subjektive Fehler bei Koppelschalthandlungen
— Störung in einem der Teilnetze bei gleichzeitiger Kopplung
— gleichzeitig zufälliger Ausfall beider Teilnetze
— Ausfall Teilnetz „Rot" bei Instandhaltung Teilnetz „Blau"
— Ausfall Teilnetz „Blau" bei Instandhaltung Teilnetz „Rot".

Die Notwendigkeit des Korrekturgliedes ergibt sich aus den Unzulänglichkeiten der Störungsstatistiken, die üblicherweise keine Trennungen in Einfach- und Doppelfehler vornehmen.

Damit entsteht für den Aufwand AW folgende Bewertungsgleichung:

$$AW(x, y, z) = K_B \quad \text{Betriebskosten}$$

$$+ x\, r\, K_J \quad \text{Investkosten}$$

$$+ y \left[\sum_{q=1}^{M} \lambda R_q K_{SRq} \text{ rotes TN} \right] \quad \left.\begin{array}{l} \\ \\ \end{array}\right\} \text{Schadenskosten}$$

$$+ \sum_{q=1}^{N} \lambda B_q K_{SBq} \text{ blaues TN}$$

$$+ z \left[\sum_{q=1}^{m} \lambda R_q f_R(T_{ARq}) \text{ rotes TN} \right] \quad \left.\begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}\right\} \text{Ausfallkosten}$$

$$+ \sum_{q=1}^{n} \lambda B_q f_B(T_{ABq}) \text{ blaues TN}$$

$$+ \sum_{q=1}^{p} \lambda G_q f_G(T_{AGq}) \text{ beide TN}$$

$$- \frac{\sum_{q=1}^{p} \lambda G_q}{2} f_R(\overline{T}_{AG}) \quad \left.\begin{array}{l} \\ \\ \end{array}\right\} \text{Korrekturglied}$$

$$- \frac{\sum_{q=1}^{p} \lambda G_q}{2} f_B(\overline{T}_{AG})$$

λ	Ausfallraten
K_S	Schadenskosten
M	Anzahl der Zuverlässigkeitselemente rotes Teilnetz für K_S
N	Anzahl der Zuverlässigkeitselemente blaues Teilnetz für K_S
m	Anzahl der Zuverlässigkeitselemente rotes Teilnetz für die Ausfallkosten
n	Anzahl der Zuverlässigkeitselemente blaues Teilnetz für die Ausfallkosten
p	Anzahl der Zuverlässigkeitselemente beider Teilnetze für die Ausfallkosten
$f(T_A)$	AUF
Index R	rotes TN
B	blaues TN
G	beide TN
x, y, z	Ungewißheitskoeffizienten.

2.2. Strategisches Entscheidungsverfahren

Da die Funktion $AW(x, y, z)$ für die einzelnen Strategien unterschiedliche Steigungen aufweisen kann und sich die Bereiche der Funktion innerhalb der E-Strategien überschneiden können, ist eine deterministische, z. B. auf der Basis der Mittelwerte getroffene Entscheidung ebenso unsicher und möglicherweise nicht zutreffend, wie ihre determinierten Mittelwerte. Bild 1 verdeutlicht das Problem bei einem Ungewißheitskoeffizienten. Deshalb werden charakteristische Werte der Funktion $AW(x, y, z)$ und die Personengefährdung, und weitere Güteattribute sind denkbar, in einer Strategie-Ziel-Matrix miteinander verknüpft. Ihre Regretmatrix, Mehrzielentscheidungsmatrix genannt, wird mit der Aufgabenstellung angepaßten Entscheidungskriterien (Minimax-Kriterium; Bayes-Laplac-Kriterium; Metakriterium) ausgewertet. Im Ergebnis werden die zur Entscheidung stehenden E-Strategien mit Rangfolgen bewertet. Rangfolgen sind deshalb erforderlich, weil sich im Gesamtsystem nicht immer die optimale Lösung eines Untersystems technisch realisieren läßt (z. B. automatische Umschalteinrichtungen) oder Restriktionen die optimale Lösung nicht zulassen. Die Elemente der Mehrzielentscheidungsmatrix sind dimensionslose be-

zogene Größen. Nur dadurch ist es möglich, qualitative und quantitativ verschiedenartige Entscheidungsziele in einer Matrix zu vereinen.

2.3. Erforderliche Voraussetzungen

Für das untersuchte Kombinat enthält das zentrale Datenblatt für die 6-kV-, 30-kV- und 110-kV-Ebene etwa 200 Daten. Sie setzen sich zusammen aus:

— Ausfallraten
— Ausfalldauern
— Instandhaltungsraten
— Instandhaltungsdauern
— durchschnittliche Schadenskosten
— Betriebskosten je Zelle
— Anwesenheitshäufigkeiten und -dauern u.a.

Gewonnen wurden wesentliche Werte aus der betrieblichen Störungsanalyse. Bei der Aufbereitung des Verfahrens zeigten sich jedoch die grundsätzlichen Mängel der Störungsanalysen, z.B. unterschiedliche Auffassungen zu Ausfalldauern, Schadenskosten und Ausfallkosten oder der Bezug der Ausfallraten auf eine Zelle, denn ein Fehler in einer Zelle hat im Bereich des Leistungsschalters und der Systemtrenner die Auswirkungen eines Sammelschienenfehlers. Derartige Mängel wurden durch Vereinbarungen beseitigt. Neben den zentralen, allgemeingültigen Daten sind zur Bewertung der Betrachtungseinheit anlagenspezifische Daten bereitzustellen. Aus diesem Grund werden zur möglichen Sicherung des Nachvollzuges der Berechnung und zum Nachweis der Objektivität der Leitungsentscheidungen Anlagendatenblätter angelegt, aus denen alle Ausgangsdaten, die Bewertungsergebnisse und getroffene Entscheidungen ersichtlich sind.
Im einzelnen enthalten sie:

— Beschreibung aller zur Bewertung stehenden E-Strategien je Betrachtungseinheit
(Übersichtsschaltbild, Netzelemente, Reserveelemente, Art der Anlage, netztechnische Daten usw.). Daraus entsteht ein Dateneingabeblatt für Zuverlässigkeitskenngrößen.
— Ausfallkosten — Unterbrechungsdauer — Funktion
Diese Funktionen für beide Teilnetze und für den Ausfall des Gesamtsystems wurden von Technologen erarbeitet. In kollektiver Schätzung wurden Erwartungswerte einschließlich ihrer Vertrauensbereiche von Produktionsausfällen bei Spannungsausfällen über der Zeit ermittelt.
Im allgemeinen ergaben sich nichtlineare Funktionen $f(T_A)$. Diese Funktionen werden mit 3 bis 10 Wertepaaren dem Rechner übergeben, der sie rechnerintern durch ein Geradenpolygon ersetzt.
— Betriebskosten
— Dateneingabeblatt zur Berechnung der Personengefährdung
— Investitionskosten
— Berechnungsergebnisse (Rechnerdruck)
— Auswertung.

Zur Sicherung der praktischen Anwendung des Verfahrens wurden an der Technischen Hochschule Zittau ein Dialogprogramm unter der Bezeichnung E 2 BUHPP in FORTRAN für den ES 1022 und ein Programm unter der Bezeichnung Mulbewe BAS in Basic 80 CP/M für den BC A 5120 entwickelt und schon mehrfach angewendet.
Durch diese, vielseitige Bedürfnisse befriedigenden Programme, durch eine umfangreiche Datenbank und durch eine Bearbeitungsvorschrift beschränkt sich der subjektive Einfluß auf eine bewußte oder unbewußte falsche Systemaufbereitung.

2.4. Anwendungsmöglichkeiten

An einem Beispiel seien die Anwendungsmöglichkeiten verdeutlicht (Bild 2):

— Bewertung von Varianten (Schaltzustände, technische und organisatorische Maßnahmen) innerhalb einer EA
— Bewertung des Istzustandes der $EA_1 \cdots EA_n$ und deren Vergleich (Schwachstellenanalyse)
— Festlegung von Rangfolgen technischer Maßnahmen im IEES auf der Basis des größten Nutzenzuwachses der optimalen Strategien in den $EA_1 \cdots EA_n$ (Investitionsplanung)
— Objektivierung von Zuverlässigkeits- und Gefährdungsanalysen in den EA
— Empfindlichkeitsanalysen des IEES bzw. einzelner Anlagen bei Veränderung der Ausgangsdaten
— Nutzerermittlungen im Rahmen der Investvorbereitung und von Neuerervorschlägen auf der Basis der Mittelwerte.

Fehlerwahrscheinlichkeitsorientierter Einsatz von Überspannungsschutzeinrichtungen in NS-Anlagen

H. Küttner, Zwickau

Vortrag zur Wissenschaftlichen Konferenz 1989 der TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen

1. Zielstellung

Ausgehend vom stochastischen Grundmodell für die Beanspruchung von NS-Isolierungen durch transiente Überspannungen wurde in einer Sensibilitätsanalyse der Einfluß der statistischen Kenngrößen der Verteilungsfunktionen auf die Fehlerwahrscheinlichkeit p_f untersucht. Die Ergebnisse sind relevant für

— Interpretation der gegenwärtigen Vorgehensweise bei der Auswahl und gegenseitigen Zuordnung standardisierter Isolations- und Schutzpegel gemäß TGL 20445/03 [1]
— Gewinnung von Aussagen zum zwingenden oder wahlweisen Einsatz von Überspannungsschutzeinrichtungen in Abhängigkeit von der Überspannungsbeanspruchung
— Bereitstellung von Kennwerten und Diagrammen zur stochastischen Bewertung deterministischer Entscheidungen.

Zur Lösung der Aufgabenstellung wird das Sicherheitsniveau der Isolations- und Schutzpegel in Abhängigkeit von der Isolationsgruppe (IG)/Anlagenklasse (AK), der Nennspannung und dem Überspannungsangebot mit der Vergleichsgröße Fehlerwahrscheinlichkeit bewertet. Die Untersuchungsergebnisse werden in einer Anwendungsrichtlinie für den Einsatz von Überspannungsschutzeinrichtungen in Abhängigkeit vom Isolationspegel und der Fehlerwahrscheinlichkeit in Kabel- und Freileitungsnetzen dargestellt. Dem Projektanten von NS-Anlagen werden Richtwerte für die maximal zulässigen Überspannungen in den AK 0 bis 4 bei fehlendem Überspannungsschutz mitgeteilt.

2. Überspannungsabhängige Vorgabe der Fehlerwahrscheinlichkeit

Wegen der Abhängigkeit der Überspannungshäufigkeit von der Überspannungsamplitude, sind die zulässigen Überspannungen für unterschiedliche Fehlerwahrscheinlichkeiten zu ermitteln. Die jähr-

Dr.-Ing. *Horst Küttner* ist Oberassistent an der Ingenieurhochschule Zwickau, Sektion Elektroautomatisierungstechnik, WB Energietechnik.

3. Zusammenfassung

Im Rahmen der steten Intensivierung der Produktion erhält eine möglichst sichere und mit minimalen Kosten realisierte (also eine optimale) industrielle Elektroenergieversorgung immer größere Bedeutung. Zur Bewertung eines IEES wurde ein rechnergestütztes Verfahren mit folgenden Wesensmerkmalen entwickelt und erfolgreich angewendet:

— Clusterung des IEES auf der Basis von AUF
— durchgängige zuverlässigkeitstheoretische Aufbereitung einschließlich Doppelfehler
— Beachtung der Ausfallkonsequenzen durch Integration nichtlinearer AUF
— Toleranz und Verarbeitung unscharfer Ausgangsdaten
— strategisches Entscheidungs- und Bewertungsverfahren
— Mehrzielentscheidungen
— Minimierung des subjektiven Faktors bei der Bewertung.

Verfahren und Programmdisketten werden für ein Aufwandsentgelt vom Gaskombinat zur Verfügung gestellt.

Literatur

[1] *Dittrich, G.:* Ingenieurtechnisches Verfahren zur Analyse und multikriteriellen Bewertung von industriellen Energieversorgungssystemen bei ungewissen Eingangsdaten. Dissertation A. Technische Hochschule Zittau 1987

EA 5990

liche Fehlerzahl λ/a errechnet sich aus der jährlichen Überspannungshäufigkeit E/a und der Fehlerwahrscheinlichkeit p_f zu

$$\lambda/a = E/a\ p_f. \qquad (1)$$

Bei Verdreifachung des Scheitelwertes der Überspannung verringert sich deren Häufigkeit in NS-Netzen nach [2] [3] [4] und eigenen Messungen [5] [6] um zwei Zehnerpotenzen (Bild 1 und Tafel 1). Da Schaltüberspannungen mit $\Delta k_{LE} \leqq 4$ die höchste Ereignishäufigkeit haben, darf ihnen nur die geringste Fehlerwahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Überspannungen mit $k_{LE} \geqq 8$ treten nur bei Kurzschlußauslösungen von Sicherungen, ungünstigen Schaltfällen und der Einwirkung äußerer Überspannungen, d.h. mit wesentlich geringerer Ereignishäufigkeit auf. Die Vorgabe der vom Überspannungsscheitelwert abhängigen Fehlerwahrscheinlichkeit erfolgt so, daß etwa gleiche jährliche Fehlerzahlen zu erwarten sind. Mit (1) und der Überspannungshäufigkeit E/a erhält man die in Tafel 2 genannten Werte. Der niedrigsten fehlerfreien Zeit entspricht die höchste jährliche Fehlerzahl und umgekehrt. Auf die Genauigkeit der Aussage wirkt sich die Breite des in ungeschützten NS-Anlagen für Überspannungsverteilungen in Frage kommenden Bereichs nachteilig aus, wobei für einen bestimmten Überspannungsscheitelwert die jährliche Ereignishäufigkeit bis zu zwei Zehnerpotenzen vom Mittelwert abweichen kann.

Eine Überspannungsverteilung mit hoher Beanspruchungshäufigkeit ist nach [3] nur in Freileitungsnetzen mit überwiegend atmosphärischen Überspannungen zu erwarten. Für Kabelnetze bzw. gemischte Netze kann von der mittleren Fehlerhäufigkeit (Bild 1) ausgegangen werden. Die den k_{LE}-Bereichen zugeordneten Fehlerwahrscheinlichkeiten führen in Kabelnetzen und gemischten Netzen zu mittleren fehlerfreien Zeiten, die weit über der normativen Nutzungsdauer der Anlage liegen. Soll in Freileitungsnetzen die fehlerfreie Zeit auch für atmosphärische Überspannungen > 50 Jahre betragen, darf für $4 \leqq k_{LE} \leqq 8$ p_f nur 10^{-5} und für $8 \leqq k_{LE} < 16$ nur 10^{-4} vorgegeben werden.

3. Bewertung der Isolations- und Schutzpegel in TGL 20445/03 [1] bei Berücksichtigung überspannungsabhängiger Fehlerwahrscheinlichkeiten

Das für Nennspannungen $60\ V \leqq U_n \leqq 1000\ V$ dargestellte $k_{LE} - \hat{u}_{90\,sts}$-Kennlinienfeld berücksichtigt drei unterschiedliche Fehlerwahrscheinlichkeiten (Bild 2), mit dessen Hilfe

- maximal zulässige Überspannungen
- Forderungen an den Überspannungsschutz und die
- fehlerwahrscheinlichkeitsgerechte Staffelung von Stehblitzspannungen

bewertet werden. Die Maßgabe gleicher Fehlerwahrscheinlichkeit für einen vorgegebenen Überspannungsscheitelwert bedingt für jede IG nur einen (nennspannungsabhängigen) $k_{LE\,zul}$-Wert. Erfordert er ein Isoliervermögen $\leqq$ der Nennstehblitzspannung, sind bei fehlendem Überspannungsschutz Überspannungen bis zur vollen Höhe der Nennstehblitzspannung zulässig.

Im Bild 2 werden die den IG entsprechenden Überspannungsscheitelwerte so gewählt, daß möglichst viele $k_{LE} - \hat{u}_{90\,sts}$-Kenn-

Tafel 1

Δk_{LE}		$\Delta \hat{u}_{02üs}$	E/a		
Bereich	Mittelwert	V	niedrig	mittel	hoch
> 2 bis ≦ 4	3	1024	0,6	200	6000
> 4 bis ≦ 8	6	2048	0,04	14	900
> 8 bis ≦ 16	12	4096	0,01	3	130

Δk_{LE} bezogener Überspannungsscheitelwert (Überspannungsfaktor) ohne 50-Hz-Grundwelle

$\Delta \hat{u}_{02üs}$ Scheitelwert der Überspannung mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2 % ohne 50-Hz-Grundwelle

E/a jährliche Überspannungshäufigkeit bei niedriger, mittlerer oder hoher Beanspruchung

Tafel 2

		$\lambda/a\ 10^{-3}$			Fehlerfreie Zeit		
k_{LE}	p_f	niedrig	mittel	hoch	höchste	mittlere	niedrigste
> 2 bis ≦ 4	10^{-5}	0,006	2	60	$16{,}7 \cdot 10^3$	500	16,6
> 4 bis ≦ 8	10^{-4}	0,004	1,4	90	$25 \cdot 10^3$	714	11,1
> 8 bis ≦ 16	10^{-3}	0,006	3	130	$16{,}7 \cdot 10^3$	333	7,7

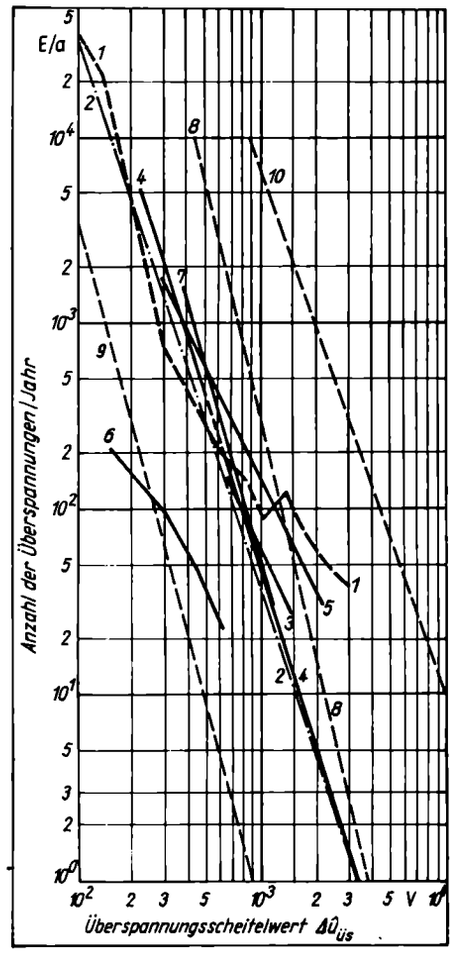
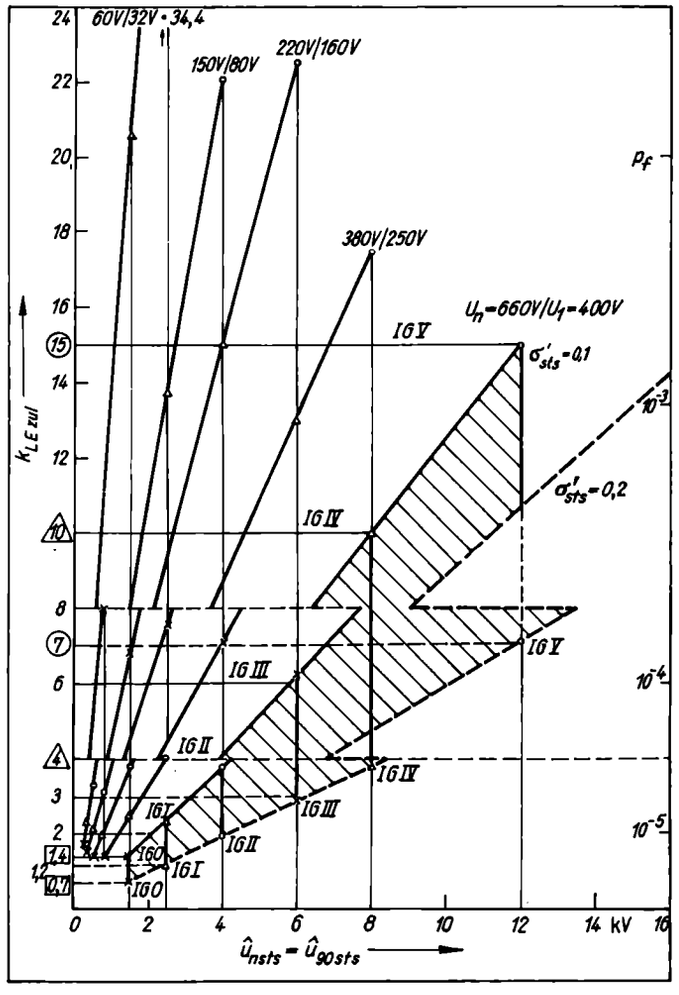
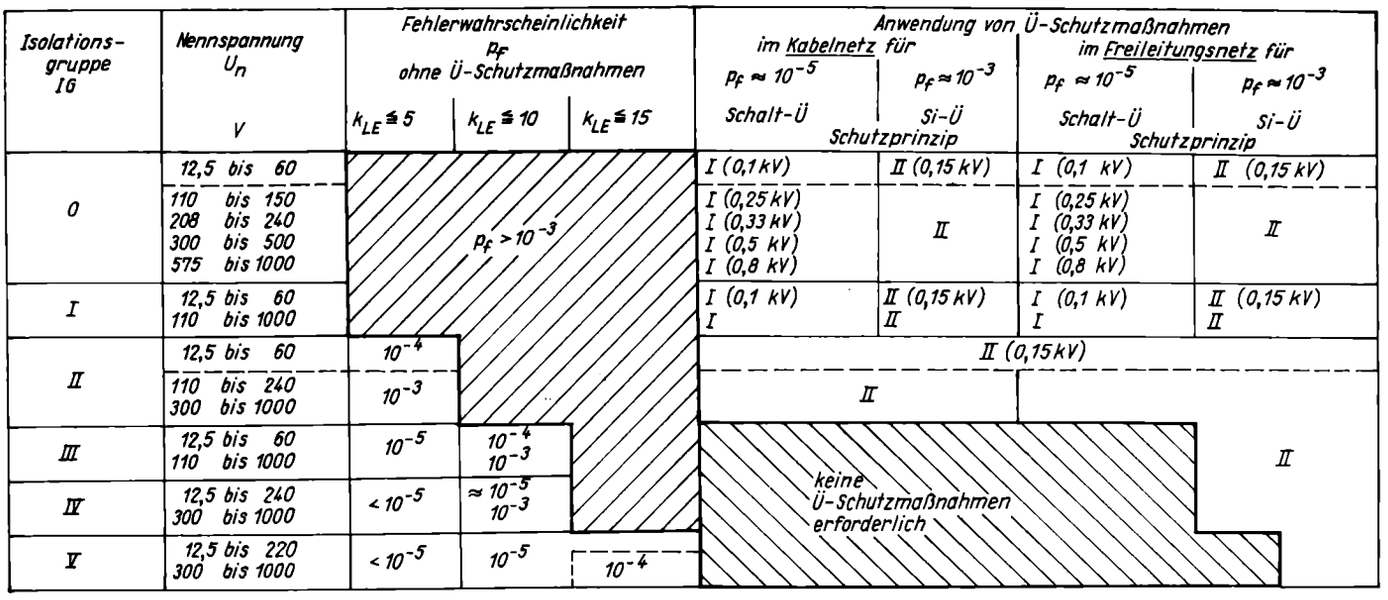


Bild 1
Häufigkeitsverteilungen von transienten Überspannungen in europäischen NS-Netzen im Vergleich mit IEEE-Standard 587 [4]
1. 380- und 500-V-Netze, BRD [2] Industrienetze, Geschäftshäuser, Labors, Haushalte, Meßzeit t_m = 3400 h, Anzahl der Überspannungen n = 28000;
2. $n \sim \frac{1}{\hat{u}_{üs}^3}$ für 1;
3. 220/380-V-Netz, Brikettfabrik [7], t_m = 6936 h, n = 327;
4. 825-V-GS-Netz, S-Bahn Berlin [8], t_m = 4300 h, n = 636;
5. 220/380-V-Netz, Textilbetrieb, t_m = 1200 h, n = 218;
6. 220/380-V-Netz, Maschinenfabrik, t_m = 1200 h, n = 456;
7. 220/380-V-Netz, Verteilung NC-Maschine, t_m = 2040 h, n = 345;
8. mittlere –;
9. niedrige –;
10. hohe Beanspruchung nach IEEE-Standard [4]
Hinweis: $\Delta \hat{u}_{üs}$ ohne 50-Hz-Spannung

Bild 2. Maximal zulässige Überspannungen ungeschützter NS-Betriebsmittel und -Anlagen in IG 0 bis V bei $\sigma_{sts}' = 0{,}1$ und 0,2





Tafel 3. Anwendungsrichtlinie für den Einsatz von Überspannungsbegrenzungseinrichtungen in der NS-Technik

Kriterium für Anwendung von Schutzprinzip I: $p_f > 10^{-5}$ für Schalt-Überspannung
Schutzprinzip II: $p_f > 10^{-3}$ für Sicherungs- und atmosphärische Überspannung

Nenn-Begrenzungsblitzspannung für Schutzprinzip I oder II nach TGL 20445/03 [1]; Klammerwerte geben reduzierte Schutzpegel an

linien in der Nähe der Nennstehblitzspannungen geschnitten werden.

Eine fehlerwahrscheinlichkeitsgerechte Staffelung der Isolations- und Schutzpegel könnte bei p_f-Abweichungen $\leqq 10\%$ durch die Reduzierung der Schutzpegel in IG 0 und I sowie durch geringfügige Änderungen der Isolationspegel in IG III bis V erreicht werden. Wegen der international bereits festgeschriebenen Auswahlreihe für Isolationspegel sollten sie beibehalten und nur die Schutzpegel geändert werden.

Die überspannungsabhängige Berücksichtigung der Fehlerwahrscheinlichkeit bestätigt für mittlere Überspannungshäufigkeiten die in der TGL 20445/03 [1] enthaltenen Forderungen zum zwingenden Einsatz von Überspannungsbegrenzungseinrichtungen bei Anwendung der niedrigen Isolationspegel von IG 0 und I.

Die Wirksamkeit der Überspannungsbegrenzungseinrichtungen ist in IG 0 generell und in IG I und II für $U_n \leqq 60$ V nur bei Reduzierung der in TGL 20445/03 enthaltenen Schutzpegel I bzw. II vorhanden.

Für ungeschützte Betriebsmittel und Anlagen im Nennspannungsbereich $220\ \text{V} \leqq U_n \leqq 660\ \text{V}$ sind Überspannungen mit einem Scheitelwert in Höhe von 50 bis 75% der zugehörigen Nennstehblitzspannung zulässig.

4. Anwendungsrichtlinie für Überspannungsbegrenzungsmaßnahmen in Kabel- und Freileitungsnetzen

Die fehlerwahrscheinlichkeitsorientierte Betrachtung der Isolations- und Schutzpegel der TGL 20445/03 [1] ist die Basis für den Einsatz von Überspannungsbegrenzungseinrichtungen (Tafel 3).

Ausgangsgröße bildet die für die charakteristischen Überspannungspegel $k_{LE} = 5$; 10 und 15 berechnete Fehlerwahrscheinlichkeit, wenn nach Isolationspegel 0 bis V isoliert wird und eine Überspannungsbegrenzung zunächst nicht vorgesehen ist. Mit Hilfe der überspannungsabhängigen Vorgabe der Fehlerwahrscheinlichkeit können folgende Kriterien für den Einsatz von Überspannungsbegrenzungseinrichtungen formuliert werden:

Schutzprinzip I für $p_f > 10^{-5}$ (Schaltüberspannungen)
Schutzprinzip II für $p_f > 10^{-3}$ (Sicherungs- und atmosphärische Überspannungen).

Fehlerwahrscheinlichkeiten $p_f > 10^{-3}$ erfordern die Anwendung der auf der rechten Seite (Tafel 3) ersichtlichen Überspannungsbegrenzungsmaßnahmen. Sie erniedrigen die Fehlerwahrscheinlichkeit, indem die Verteilungsfunktion der Überspannungen bei der Nennbegrenzungsspannung durch die Begrenzungseinrichtung abgeschnitten wird. Bei gleichem Isoliervermögen erhöhen Überspannungsbegrenzungseinrichtungen die Zuverlässigkeit gegen transiente Überspannungen nur dann, wenn die Nennbegrenzungsspannung entsprechend niedrig gewählt ist. Die Überspannungsschutzkonzeption enthält gegenüber TGL 20445/03 [1] gesenkte Schutzpegel. Gewährleistet die Höhe des TGL-Schutzpegels die Einhaltung des Fehlerwahrscheinlichkeitskriteriums, kann er unverändert beibehalten werden.

Die Notwendigkeit von Überspannungsbegrenzungsmaßnahmen wird darüber hinaus von der Netzart bestimmt. Nur in Freileitungs- oder gemischten Netzen müssen atmosphärische Überspannungen berücksichtigt werden. Im Kabelnetz ist in AK 0 bis 2 der Einsatz von Überspannungsbegrenzungseinrichtungen zwingend — z.T. mit reduziertem Schutzpegel —, in AK 3 und 4 sind keine Überspannungsschutzmaßnahmen erforderlich. In gemischten Netzen kann nur in AK 4 auf einen Überspannungsschutz verzichtet werden, wenn in der verkabelten Anlage atmosphärische Überspannungen weitgehend ausgeschlossen werden können. In reinen Freileitungsnetzen ist auch bei AK 4 unabhängig von der Fehlerwahrscheinlichkeit die Begrenzung der atmosphärischen Überspannungen zu empfehlen.

5. Zusammenfassung

Durch die Einbeziehung einer statistischen Betrachtungsweise wird die Sicherung und evtl. Korrektur der Basisgrößen der empirischen Isolationskoordination in der NS-Technik möglich. Die aus einer Sensibilitätsanalyse zur Fehlerwahrscheinlichkeit abgeleiteten Schlußfolgerungen orientieren auf die Beibehaltung der standardisierten Isolationspegel bei konsequenter Realisierung von Überspannungsschutzmaßnahmen.

Der zwingende bzw. wahlweise Einsatz von Überspannungsbegrenzungseinrichtungen kann in Abhängigkeit von der Isolationsgruppe/Anlagenklasse und der Nennspannung einer Anwendungsrichtlinie für Kabel- und Freileitungsnetze entnommen werden. Die standardisierten Schutzpegel müssen z.T. nach unten verändert werden.

Der bisher oft vernachlässigte Überspannungsschutz erfordert insbesondere durch den ständig steigenden Einsatz von msr-Technik in NS-Anlagen die Entwicklung anwenderfreundlicher Überspannungsbegrenzungsgeräte in Modultechnik.

Literatur

[1] TGL 20445/03. Isolationskoordination: Betriebsmittel und Anlagen mit Wechselspannungen bis 1000 V. Ausgabe 2. 86
[2] *Meissen, W.:* Überspannungen in Niederspannungsnetzen. etz Bd. 104 (1983) 7/8, S. 343–346
[3] *Martzloff, F. D.:* Matching Surge Protective Devices to Their Enviroment. IEEE on Industry Applications 1A-21 (1985) 1, S. 99–106
[4] IEEE Standard 587. Guide on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits (Now designated ANSI/IEEE C 62.41 — 1980) 1980
[5] *Küttner, H.:* Untersuchungen zur Spannungsbeanspruchung und Dimensionierung von Niederspannungsisolierungen. Dissertation A, TU Dresden 1979
[6] *Küttner, H.:* Ermittlung der Überspannungsbeanspruchung in Niederspannungsanlagen. Der VEM-Elektro-Anlagenbau 13 (1977) 3, S. 190–192
[7] *Girndt, K.:* Messung von netzseitigen Überspannungen in den Einsatzbereichen der Halbleiterbauelemente. Der Elektropraktiker, Berlin 32 (1978) 7, S. 224–227
[8] *Girndt, K.:* Beitrag zur Beanspruchung der Thyristoren durch netzseitige Überspannungen. Dissertation A. TU Dresden 1975

EA 5992

Zum Langzeitverhalten von Steckverbindungen der Elektroenergietechnik

St. Großmann; H. Böhme; Dresden

Mitteilung aus dem VEB „Otto Buchwitz" Starkstrom-Anlagenbau Dresden und der Technischen Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik

Vortrag zur Wissenschaftlichen Konferenz 1989 der TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen

Technisch wichtigstes Beurteilungskriterium für Steckverbindungen — als Trennstelle oder Montageverbindung in Elektroenergieanlagen — ist deren elektrischer Widerstand. Er entscheidet über Erwärmung, Verluste, Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Verbindung [1]. Der Widerstand im Neuzustand der Verbindung wird von konstruktiven Parametern (z.B. Verbindungskraft, Anzahl paralleler Kontaktstellen, Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktstücke) und dem Kontaktmaterial bestimmt.

Der Widerstandsverlauf im Langzeitverhalten von Steckverbindungen ist vom Widerstand im Neuzustand der Verbindung sowie von der thermischen, umgebungsbedingten und mechanischen Belastung abhängig. Eine quantitative Beurteilung des Langzeitverhaltens erfordert Untersuchungen über mehrere Jahre (mindestens 1 Jahr) unter den im Betrieb zu erwartenden Bedingungen.

1. Experimente

In Langzeituntersuchungen über ein bis fünf Jahre wurde der Einfluß folgender Parameter auf den Widerstandsverlauf von Steckverbindungen untersucht [2] [3]:

— Kontaktmaterial (Silber, Kupfer, Aluminium)

— umgebungsbedingte Belastung (Labor; Industrieatmosphäre — Braunkohlenkraftwerk; 0,75 mg/m³-SO_2-Luft-Gemisch Außenraum)

— thermische Belastung (Strom $I = 0$; Lastwechsel mit Strom I, so daß die Kontaktstücktemperatur $20\,°C \leqq \vartheta_k \leqq 40\,°C$ bzw. $20 \leqq \vartheta_k \leqq 100\,°C$ beträgt)

— mechanische Belastung (Einfluß der Reibung beim Stecken auf die beabsichtigte Zerstörung von Fremdschichten auf Kupferkontaktstücken und die ungewollte Zerstörung der Silberschicht auf galvanisch versilberten Kontaktstücken).

Dr.-Ing. *Steffen Großmann* ist Forschungsleitingenieur im VEB „Otto Buchwitz" Starkstromanlagenbau Dresden, Prof. Dr. sc. techn. *Helmut Böhme* ist Inhaber des Lehrstuhls für Hochspannungsgeräte an der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden.

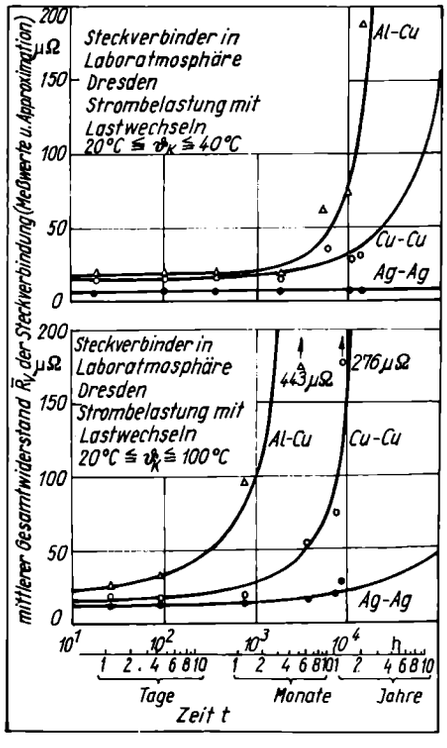
Bild 1
Widerstandsverlauf $\bar{R}_V(t)$, abhängig vom Kontaktmaterial und der thermischen Belastung

Bild 2
Widerstandsverlauf $\bar{R}_V(t)$, abhängig vom Kontaktmaterial und der umgebungsbedingten Belastung

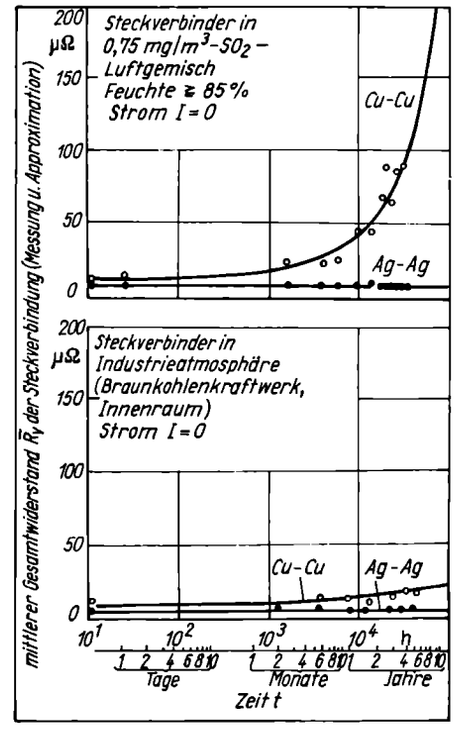
Bild 3
Aufteilung des Stromes auf 20 parallele Kontaktfinger einer Steckverbindung, abhängig von der Anzahl der Lastwechsel

Bild 4
Widerstand R_V der Verbindung, abhängig von der Anzahl der Steckspiele beim Reiben gekreuzter Kupferzylinder

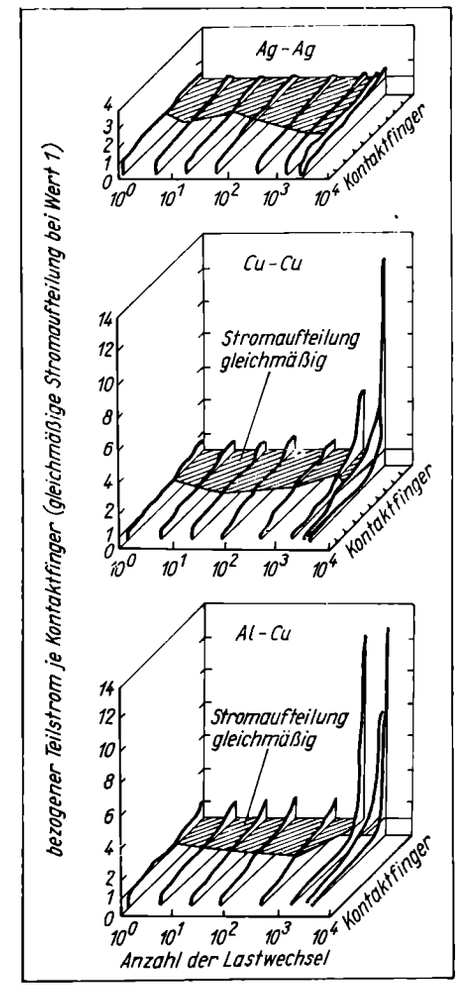
Bild 5
Widerstand R_V der Verbindung, abhängig von der Anzahl der Steckspiele beim Reiben versilberter Kontaktstücke



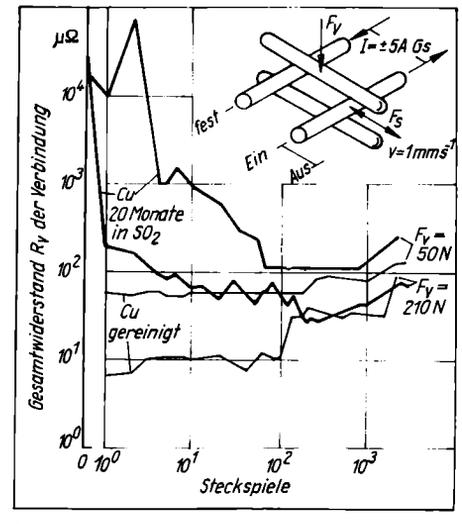
1



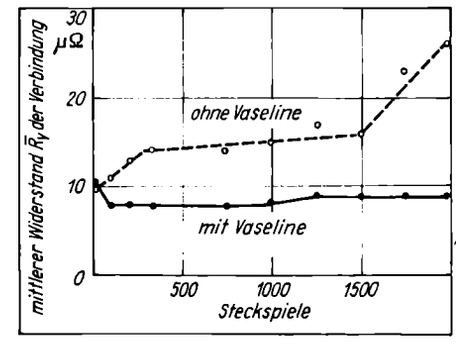
2



3



4



5

Sicherheitstechnische Bewertung technologischer Prozesse in der Fertigung des Elektroenergieanlagenbaus

A. Weigt, KDT, Cottbus

Vortrag zur Wissenschaftlichen Konferenz 1989 der TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen

Verwendete Formelzeichen

a	Anzahl der Arbeitsplätze in der Fertigungsabteilung
b	Anzahl der Fertigungsabteilungen im Betriebsteil bzw. Betrieb
c	Anzahl der Betriebsteile im Betrieb
K_{SG}	Sicherheitstechn. Niveau
$\breve{K}_{SG-P}$	Sicherheitstechnisches Niveau des Arbeitsplatzes (gewichteter Wert)
$\overline{K}_{SG-F}$	Sicherheitstechn. Niveau der Fertigungsabteilung (arithmetischer Mittelwert)
$\overline{K}_{SG-B}$	Sicherheitstechn. Niveau des Betriebes
$\breve{K}_{1-S}$	Sicherheitstechn. Niveau der Arbeitsstätte S (gewichteter Wert)
$\breve{K}_{2-A}$	Sicherheitstechn. Niveau der Arbeitsmittel A (gewichteter Wert)
$\breve{K}_{3-V}$	Sicherheitstechn. Niveau der Arbeitsverfahren V (gewichteter Wert)

Dr.-Ing. *Adolf Weigt* ist Bereichsleiter Rationalisierung im VEB Textilkombinat Cottbus.

2. Versuchsergebnisse

• Kontaktmaterial (Bilder 1 bis 3)

Versilberte Kontaktstücke altern über mehrere Jahre nicht oder nur sehr langsam. Der Strom teilt sich nahezu gleichmäßig auf parallele Kontaktstücke auf. Unversilberte Kupferkontaktstücke altern sehr viel schneller als versilberte, die Streuung der Widerstandswerte beträgt ein mehrfaches, und die unversilberte Kupferverbindung reagiert wesentlich empfindlicher auf thermische und umgebungsbedingte Belastungen. Der Strom teilt sich mit der Zeit zunehmend ungleich auf parallele Kontaktstücke auf, was zu einer beschleunigten Alterung führt. Aluminium ist als Kontaktmaterial für Steckverbindungen ungeeignet.

• Umgebungsbedingte Belastung (Bild 2)

Der Verbindungswiderstand der im SO_2-Außenraumklima ausgelagerten Proben vergrößert sich schneller als bei vergleichbaren Experimenten im Innenraumklima des Braunkohlenkraftwerks.

• Thermische Belastung (Bild 1)

Die Alterung hängt in entscheidendem Maße von der Temperatur an der Kontaktstelle, verursacht durch Stromwärmeverluste, ab. Sie ist als wesentliche Einflußgröße zu betrachten.

• Mechanische Belastung (Bilder 4 und 5)

Ein Vergleich gereinigter, gekreuzter Kupferzylinder (Bild 4) mit solchen, die 20 Monate im SO_2-Außenraumklima gelagert waren, zeigt, daß die entstandene Fremdschicht auf der Kupferoberfläche unter Verbindungskräften von 50 bzw. 210 N beim ein- oder mehrmaligen Stecken nicht ausreichend zerstört wird. Die Widerstandswerte gereinigter Kupferkontaktstücke werden nicht oder erst nach einigen hundert Steckspielen erreicht, was für die Praxis unbedeutend ist. Werden versilberte Kontaktstücke (Bild 5) mit technischer Vaseline geschmiert, kann der mechanische Abrieb der Silberschicht und eine damit verbundene Erhöhung des Verbindungswiderstandes verhindert werden.

Literatur

[1] *Böhme, H.; Großmann, S.; Löbl, H.:* Zum Langzeitverhalten von Kontaktverbindungen der energetischen Elektrotechnik. Wiss. Z. der TU Dresden 37 (1988) 4, S. 153–159

[2] *Großmann, S.:* Zur Gestaltung und zum Betriebsverhalten von Steckverbindungen der Elektroenergietechnik. Dissertation TU Dresden 1988

[3] *Großmann, S.; Böhme, H.; Löbl, H.:* Zum Langzeitverhalten von Steckverbindungen der Elektroenergietechnik — Widerstandsverlauf. ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 4, S. 143–147

EA 5993

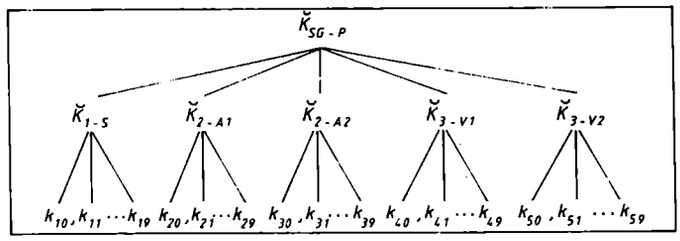


Bild 2
Strukturschema für die Arbeitsplatzbewertung bei zwei Arbeitsmitteln und Arbeitsverfahren

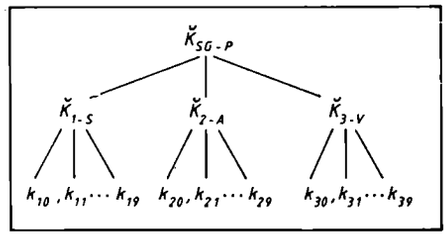


Bild 1
Strukturschema für die Arbeitsplatzbewertung

K_j	Sicherheitstechn. Niveau einer Eigenschaftsgruppe
k_{ji}	Niveaukennzahl der Einzeleigenschaften
M_j	Wichtungskoeffizient der Eigenschaftsgruppe
m_{ji}	Wichtungskoeffizient der Einzeleigenschaften

1. Problem und Zielstellung

Im Ergebnis der Sicherheitsbewertung technologischer Prozesse ist letztlich zu entscheiden, ob Schutzgüte für den Prozeß oder die Prozeßabschnitte erteilt werden kann. Der Begriff Schutzgüte [1] begrenzt sich auf den Teil der Qualität der Arbeitsmittel (A), Arbeitsverfahren (V) und Arbeitsstätten (S), der sich auf ihre sichere und erschwernisfreie Gestaltung bezieht. Deshalb müssen bei der Bewertung die Aspekte Sicherheit und Erschwernisfreiheit berücksichtigt werden. Voraussetzungen dazu sind eine für die Sicherheitsbewertung geeignete Darstellung des technologischen Prozesses und die Auswahl geeigneter mathematischer Verfahren für eine möglichst objektive Bewertung. Schutzgütenachweise hatten im analysierten Bereich der Fertigung des Elektroenergieanlagenbaus, insoweit sie überhaupt vorlagen, verbalen Charakter. Quantitative sicherheitstechnische Bewertungen, wie sie auf dem Gebiet der Elektrosicherheit mit Erfolg angewendet werden [2], existieren nicht. Deshalb bestand die Zielstellung, Vorschläge für eine quantitative Bewertung zu erarbeiten, wobei kein statistisches Material vorlag. Der folgende Beitrag enthält die Ergebnisse, die an zahlreichen Beispielen in der Fertigung des Elektroenergieanlagenbaues erprobt wurden.

2. Vorschläge zur Sicherheitsbewertung technologischer Prozesse

2.1. Darstellung des technologischen Prozesses für die Sicherheitsbewertung

Für die Abbildung des technologischen Prozesses sind mehrere aus der Operationsforschung bekannte Darstellungen möglich. Bei der Praxiserprobung fiel die Entscheidung zugunsten einer logischen Verknüpfung von Arbeitsplätzen in Felddarstellung. Insofern sie nicht schon z. B. aus einer Automatisierungskonzeption hervorgeht, kann die Abbildung des technologischen Prozesses auf die Darstellung der Stoff- und Informationsflüsse beschränkt werden, die für die Sicherheitsbewertung relevant sind. Die beteiligten Prozeßgrößen für die Sicherheitsbewertung Arbeitsmittel, Arbeitsverfahren und Arbeitsstätten wurden auf den Arbeitsplatz bezogen zusammengefaßt, weil dort der Mensch in Erscheinung tritt und das Zusammenwirken der Arbeitsmittel und Arbeitsverfahren in der Arbeitsstätte erfolgt. Damit sind alle bei der technischen Sicherheitsbewertung in Betracht kommenden Prozeßgrößen einbezogen.

2.2. Bewertungsgrundlagen

Bewertungsgrundlagen sind die sicherheitstechnischen Forderungen, wie sie in Rechtsvorschriften (GBl., TGL, betriebliche Regelungen u. a.) für Arbeitsmittel, Arbeitsverfahren und Arbeitsstätten festgelegt sind. Dabei muß unterstellt werden, daß diese Rechtsvorschriften den Maßstab der gesellschaftlichen Erwartungen an das sicherheitstechnische Niveau bilden. Soweit keine meßbaren Größen vorliegen, wird die Expertenmethode angewendet. Dazu ist erforderlich, die jeweils geltenden sicherheitstechnischen Forderungen für den zu bewertenden technologischen Prozeß übersichtlich in Tabellen zusammenzustellen. Die Auswahl der Experten erfolgt objektbezogen, wobei die Zusammensetzung einer Schutzgütekom-

mission von 4 bis 6 Mitgliedern entsprechen sollte. Anwendung findet die Fragebogenmethode. Wesentlich sind eine gute organisatorische Vorbereitung und die Motivation der Experten.

2.3. Bewertungsverfahren

Bei der Festlegung des Bewertungsverfahrens kommen vorerst nur mathematische Verfahren in Frage, die nicht unbedingt an statistisches Material gebunden sind. Aus dem Vergleich bekannter Verfahren eignet sich die in [3] beschriebene qualimetrische Bewertung der Elektrosicherheit. Voraussetzung ist eine Klassifikation des Sicherheitsniveaus im Bereich $0 \cdots 1$.
Das Gleichungssystem der Form

$$\breve{K}_{\mathrm{SG\text{-}P}} = \sum_{j=1}^{j=N} \left(M_j \sum_{i=1}^{i=n} m_{ij}\, k_{ij} \right) \tag{1}$$

mit den Wichtungsbedingungen

$$\sum_{i=1}^{i=n} m_{ji} = 1; \quad \sum_{j=1}^{j=N} M_j = 1$$

läßt sich für die Bewertung technologischer Prozesse anwenden. Bezogen auf die Bewertung von A, V und S gilt:

$$\sum_{i=1}^{i=n} m_{ji}\, k_{ji} = \breve{K}_j \triangleq \breve{K}_{1\_S};\ \breve{K}_{2\_A};\ \breve{K}_{3\_V}.$$

Die Arbeitsmittel, Arbeitsverfahren und Arbeitsstätten werden als Eigenschaftsgruppen und die Sicherheitsparameter der Eigenschaftsgruppen als Einzeleigenschaften aufgefaßt. Man erhält bezogen auf den Arbeitsplatz ein Strukturschema mit zwei Niveaustufen nach Bild 1. Die Anzahl der Eigenschaftsgruppen bleibt dabei auf drei begrenzt, und die Anzahl der Einzeleigenschaften läßt sich auf maximal zehn beschränken. Die Begrenzung auf zehn Einzeleigenschaften ist zweckmäßig, um den Aufwand zur Bewertung vertretbar zu halten. Bei mehreren Arbeitsmitteln (A) und/oder Arbeitsverfahren (V) am Arbeitsplatz (P), z.B. bei der Mehrmaschinenbedienung, gilt analog das Strukturschema gemäß Bild 2 mit zwei Niveaustufen.
Das sicherheitstechnische Niveau der Fertigungsabteilung $K_{\mathrm{SG\text{-}F}}$ wird durch den arithmetischen Mittelwert der Anzahl a der Arbeitsplätze P bestimmt:

$$\overline{K}_{\mathrm{SG\text{-}F}} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{i=a} \breve{K}_{(\mathrm{SG\text{-}P})i}. \tag{2}$$

Mit Hilfe des Mittelwertes der Summe aller zugehörigen Fertigungsabteilungen kann das sicherheitstechnische Niveau der Betriebsteile bzw. Betriebe bestimmt werden:

$$\overline{K}_{\mathrm{SG\text{-}B}} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^{i=b} \overline{K}_{(\mathrm{SG\text{-}F})i}. \tag{3}$$

Für die Bewertung im Bereich $0 \cdots 1$ gilt folgendes Klassifikationsschema:

Klasse I

1,0 ··· 0,87 Angestrebter Bereich
Durch die technische Gestaltung der A, V, S sind Gefährdungen ausgeschlossen.

0,86 ··· 0,78 Gefährdungen werden durch zusätzliche, möglichst umfassende und zwangsläufig wirkende technische Mittel ausgeschlossen.

Klasse II

0,77 ··· 0,60 Noch zulässiger Bereich

Klasse III

$< 0{,}60$ Unzulässiger Bereich
Schutzgüte kann nicht erteilt werden.

3. Eingrenzung und Verallgemeinerungsfähigkeit

Die Sicherheitsbewertung technologischer Prozesse wurde anfangs auf Prozesse der stationären Fertigung im Elektroenergieanlagenbau beschränkt. Praktische Untersuchungen erfolgten dann am Beispiel der Produktion von Mittelspannungsleistungsschaltern. Diese Erkenntnisse wurden auf weitere Schaltgeräte übertragen und schließlich auf das Werkstättenprinzip insgesamt angewendet. Die in letzter Zeit durchgeführten Arbeiten zur Sicherheitsbewertung bestätigen die Erzeugnisunabhängigkeit der angewandten Methode und ermöglichen eine erste Verallgemeinerung. In zweierlei Hinsicht sind jedoch Eingrenzungen erforderlich:
Erstens bezieht sich die arbeitsplatzbezogene Sicherheitsbewertung auf die unmittelbare Produktion. Die sicherheitstechnische Bewertung der Instandhaltung technologischer Prozesse wurde bisher nicht untersucht. Da sich die Charakteristik des Arbeitsplatzes und evtl. auch die Arbeitsstätten in der Instandhaltung wesentlich ändern, gelten für die Bewertung auch andere Sicherheitskriterien. Zweitens wurden an flexiblen Fertigungsabschnitten mit hohem Automatisierungsgrad noch keine praktischen Untersuchungen durchgeführt. Weil sich der Charakter der Gefährdungen mit zunehmendem Industrierobotereinsatz wandelt, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

4. Zusammenfassung

Mit der sicherheitstechnischen Bewertung technologischer Prozesse wird das Ziel verfolgt, das sicherheitstechnische Niveau der Prozeßparameter Arbeitsmittel (A), Arbeitsverfahren (V) und Arbeitsstätten (S) quantitativ zu bewerten.
Das Ergebnis besteht in der Gewinnung von Niveaukennzahlen und ist eine Entscheidungshilfe bei der Erstellung des Schutzgütenachweises für Arbeitsplätze, Fertigungsabteilungen und Betriebe. Es wurden Grundlagen zur Bewertung erarbeitet und an charakteristischen Beispielen durch Praxiserprobung nachgewiesen. Diese Grundlagen bestehen in der Auswahl des Arbeitsplatzes als Bezugspunkt der Sicherheitsbeurteilung, in einer für diese Zwecke ausreichenden Abbildung des technologischen Prozesses und der Festlegung eines Algorithmus. Das sicherheitstechnische Niveau wird nach der Erfüllung sicherheitstechnischer Forderungen aus Rechtsvorschriften beurteilt. Soweit den sicherheitstechnischen Forderungen keine meßbaren Größen zugrunde liegen, wird die Expertenmethode angewendet.

Literatur

[1] Dritte Durchführungsbestimmung zur ASVO Schutzgüte. GBl. der DDR v. 19. 02. 1980 Teil I Nr. 6, S. 45
[2] *Altmann, S.:* Möglichkeiten einer verbesserten Sicherheitsbeurteilung elektrotechnischer Anlagen durch Anwendung der qualimetrischen Schutzgütebewertung. ELEKTRIE, Berlin 33 (1979) 6, S. 303–308
[3] *Altmann, S.:* Statistische Auswertung der Expertenbefragung zur Ermittlung der subjektiven Wahrscheinlichkeit „Elektrosicherheit" einschließlich Interpretationsvarianten und Abschlußbetrachtungen zur qualimetrischen Sicherheitsbewertung. WK TH Leipzig, SEA (1985) 13, S. 1–15

Diese Arbeit entstand während der außerplanmäßigen Aspirantur des Autors an der Sektion Elektroenergieanlagen der TH Leipzig, Lehrstuhl GET (Prof. *Altmann*).

EA 5991

Nachweis der Elektroenergiequalität durch Flickermessung

P. Baier; Th. Kröber; Leipzig

Vortrag zur Wissenschaftlichen Konferenz 1989 der TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen

Als Träger jeder Veränderung der Elektroenergiequalität ist die Spannung des dreiphasigen Elektroenergiesystems anzusehen. Bewertet wird die Elektroenergiequalität deshalb durch die Kenngrößen der Spannung. Die daraus abgeleiteten Qualitätsfaktoren beziehen sich auf Veränderungen von Amplitude, Phasenwinkel, Form, Symmetrie und Lage.
Besondere Bedeutung hat die Amplitudenänderung, wobei Spannungsabweichungen und Spannungsschwankungen zu unterscheiden sind. Letztere stellen transiente Änderungen der Betriebsspannung dar, die gegenüber den Spannungsabweichungen (zulässiges Band der Betriebsspannung) grundsätzlich anders zu bewerten sind. Ursachen der zeitlichen Schwankung der Betriebsspannung sind Abnehmer mit entsprechend schwankendem Leistungsbedarf, z.B. Lichtbogenöfen, Schweißmaschinen, Geräte mit Vollwellensteuerung, Aufzüge.
Die zeitlichen Laständerungen führen über die Netzimpedanzen zu transienten Spannungsänderungen am betrachteten Verknüpfungspunkt. Dabei können an den dort angeschlossenen Abnehmern Beeinträchtigungen ihrer Funktionen entstehen (Störung elektronischer Steuerungen, Anregung von Schwingungen) oder bei elektrischen Beleuchtungsanlagen Leuchtdichteschwankungen auftreten. Letztere verursachen beim Menschen über das Sehorgan nachteilige physiologische Wirkungen. Dem liegt als physikalisches Wirkungsprinzip die Umwandlung der Energieschwankung des

Dr.-Ing. *Peter Baier* ist wiss. Assistent an der TH Leipzig, Sektion Elektroenergieanlagen (Lehrstuhl Prof. Dr. sc. techn. *W. Mierke*); Dipl.-Ing. *Thomas Kröber* ist Entwicklungsingenieur an derselben Einrichtung (Lehrstuhl Prof. Dr. sc. techn. *S. Altmann*).

Lichtstroms in Bioenergie zugrunde. Begrenzungen der Spannungsschwankung sind gerade wegen dieser Störempfindungen notwendig.

1. Bewertungskenngrößen

Die zur Beurteilung der störenden Leuchtdichteänderung verantwortliche Spannungsschwankung ist aus dem Energieinhalt der Spannungshüllkurve zu ermitteln, was über den Wert der ihm proportionalen Schwankungsdosis erfolgen kann [1]. Der Eindruck einer Leuchtdichteschwankung bei einer Frequenz der Leuchtreizänderung zwischen einigen Herz und der Bildbeständigkeitsfrequenz wird Flicker genannt. Dabei werden nicht die Leuchtdichteänderungen selbst, sondern die Amplituden der Spannungsschwankungen berücksichtigt, die mit normalen Glühlampen die gleichen Leuchtdichteänderungen verursachen würden [2]. Untersuchungen und Testreihen, die seit über 20 Jahren in verschiedenen Ländern durchgeführt wurden, haben zu Grenzlinien der Wahrnehmbarkeit bzw. Erträglichkeit der Flickerstörung geführt. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde von internationalen Gremien eine Amplituden-Frequenzkennlinie (Flickerkurve) als Grenzkennlinie angegeben, die von der CENELEC (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung) ausgearbeitet wurde. Sie findet gegenwärtig in zahlreichen nationalen Vorschriften und Empfehlungen, so auch im DDR-Standard „Elektroenergiequalität" (TGL 43624/02), ihren Niederschlag (Bild 1), Nach diesem Standard ist die Spannungsschwankung über eine Flickermessung durchzuführen.

Für die Analyse der Hüllkurve der Spannungsschwankung, die durch die zeitlichen Intervalle zwischen den Änderungen und deren Amplitude gekennzeichnet werden, genügen folgende Differenzierungen [3]:

1. regelmäßige Intervalle und konstante Amplitude
2. unregelmäßige Intervalle und konstante Amplitude
3. regelmäßige Intervalle und variable Amplitude
4. unregelmäßige Intervalle und variable Amplitude.

2. Bewertungsmodelle

Ausgehend von diesen Kategorien der Spannungsschwankungen sind grundsätzlich zwei Bewertungsmodelle anwendbar:

- analytisches Verfahren
- Flicker-Meßverfahren.

Die Methode des analytischen Verfahrens ordnet der Anzahl der Störungen je Zeiteinheit eine Spannungsänderung zu, wobei die Flicker-Grenzkennlinie anzuwenden ist. Dabei werden praktisch Rechteckschwankungen angenommen. Sie verursachen gegenüber anderen Schwankungsformen die ungünstigsten Auswirkungen. Zu bemerken ist, daß die übliche Handhabung der Amplituden-Frequenzkennlinie für das menschliche Auge, vor allem aus meßtechnischen Gründen, von einem sinusförmigen Verlauf der Schwankung ausgeht [4]. Das analytische Verfahren ist damit für die erste obengenannte Art der Spannungsschwankung uneingeschränkt und für die Zweite unter Berücksichtigung einer Klasseneinteilung einsetzbar.

Eine für alle Kategorien anwendbare Bewertung besteht nur in der Flicker-Messung. Eine Flicker-Meßmethode enthält das Meßinstrument selbst und eine Anweisung darüber, wie die Ergebnisse zu bewerten sind. Die Beurteilung der Störempfindung des Flickers ist stets an seine Wahrnehmbarkeitsschwelle gebunden. Dazu wurden 1972 durch *Roufs* umfangreiche Flicker-Wahrnehmungstests mit einer großen Anzahl von Personen durchgeführt. 1983 ist im Bericht C 07 der CIRED, als erster Schritt zur Vereinheitlichung eines Flicker-Meßgerätes, eine zusammenfassende Untersuchung über die Meßergebnisse existierender Flicker-Meßgeräte vorgelegt worden. In diesem Zusammenhang wurde vom UIE-Komitee „Störwirkungen" ein UIE-Flickermeter konzipiert und beschrieben, das die Messung des Flickers unterschiedlicher Quellen ermöglichen soll. Wegen der Vergleichbarkeit ist dabei von einer festgelegten Bezugslampe auszugehen (Doppelwendelfaden-Glühlampe 230 V, 60 W). Um allen Anforderungen unterschiedlicher Flicker genügen zu können, ist es außerordentlich zweckmäßig, Lampe und menschliches Sehsystem zu simulieren. Untersuchungen ergaben mehrere Psychophysiologien. Nach zahlreichen Tests und internationalen Demonstrationsvorführungen wurde das Gesamtverhalten des Meßgeräts für sinus- und rechteckförmige Spannungsschwankungen in tabellarischer Form festgelegt. So ist die Übertragungsfunktion der Analogimplementierung des Flickermeters [5] [6] für die Demodulation der beeinflußten Betriebsspannung und die Wichtung der unterschiedlichen Frequenzen der Spannungsschwankung wie folgt

Bild 1
Grenzkennlinie der zulässigen relativen Schwankungsamplitude

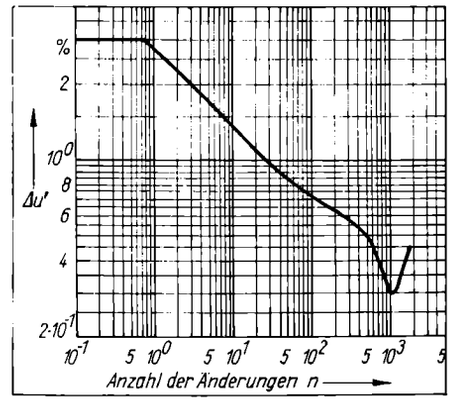
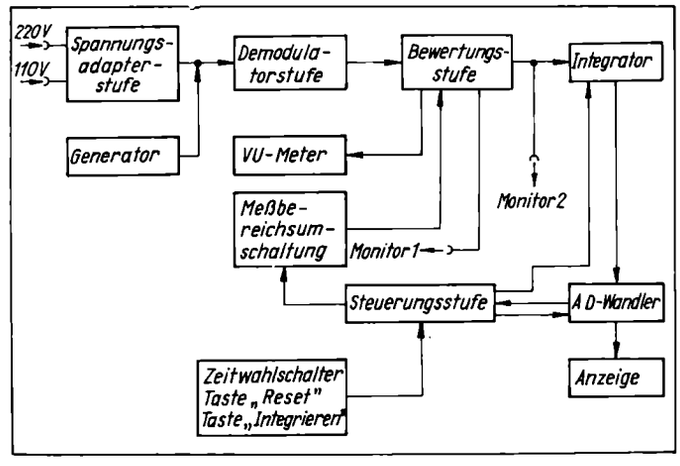


Bild 2
Blockschaltbild FDM 2



zu beschreiben:

$$F(p) = \frac{k\,\omega_1\,p}{p^2 + 2\,\lambda\,p + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + p/\omega_2}{(1 + p/\omega_3)\,(1 + p/\omega_4)} \qquad (1)$$

mit

$k = 1{,}74822$ $\qquad$ $k = 2\,\pi \cdot 2{,}27979$
$k = 2\,\pi \cdot 4{,}05981$ $\qquad$ $k = 2\,\pi \cdot 1{,}22535$
$k = 2\,\pi \cdot 9{,}15494$ $\qquad$ $k = 2\,\pi \cdot 21{,}9.$

Neben einem Statistikblock, der die statistische Flicker-Analyse vornehmen soll, ist das Gerät so konzipiert, daß sowohl die momentane Flicker-Empfindung (Augenblicksflickerniveau) als auch die bisher vorwiegend verwendete Flickerdosis gemessen bzw. aufgezeichnet werden kann [2]. Bei ihrer Definition wird davon ausgegangen, daß es möglich ist, eine sinusförmige Spannungsschwankung mit der Schwankungsamplitude a_f und der Frequenz f durch eine sinusförmige Schwankung mit der Amplitude a_{10} und einer Frequenz von 10 Hz zu ersetzen. Beide Schwankungen rufen dann den gleichen störenden Eindruck hervor, wenn ein Faktor g_f berücksichtigt wird, der einer experimentell ermittelten frequenzabhängigen Funktion entnommen wird und die Empfindlichkeit des menschlichen Auges berücksichtigt:

$$a_{10} = g_f \cdot a_f\,. \qquad (2)$$

Beim Auftreten unterschiedlicher Frequenzen erfolgt die Bewertung nach

$$a_{10} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} g_f(i)\,a_f^2(i)}\,. \qquad (3)$$

Unter Beachtung des bereits erwähnten Zusammenhangs zwischen der Schwankungsenergie der Hüllkurve und dem Störempfinden beim Menschen, wird die Flickerdosis definiert:

$$FD = \int_0^{\Theta} a_{10}^2\,\mathrm{d}t\,, \qquad (4)$$

wobei sich ihre Einheit mit $(\%)^2$ min ergibt. Die Steigung der Dosiskurve kann dann als Maß für die Zulässigkeit eines Flickers gewertet werden. Als Wahrnehmbarkeitsschwelle gilt 0,3% der Spannungsschwankung bei $f = 10$ Hz. Im IEC-Report 1986 [6] wurde die oben beschriebene Konzeption des Flicker-Meßgeräts von 1983 bestätigt und durch eine Funktions- und Auslegungsbeschreibung ergänzt, die auch im Rahmen eines Entwurfs für Meßgeräte zur Beurteilung der elektromagnetischen Verträglichkeit (VDE 0846) 1987 unverändert übernommen worden ist.

3. Flicker-Meßgerät der Technischen Hochschule Leipzig

Das an der THL entwickelte Flicker-Meßgerät FDM 2 entspricht in wesentlichen Teilen den Anforderungen der IEC, wobei der Statistikblock durch eine vorgesehene Rechnerkopplung mit dem von der TU Dresden entwickelten Mikrorechnerbaustein MVAS 1 (Meßwertverarbeitungsanzeige und -speicherung) realisiert werden kann. Den Signalflußplan zeigt Bild 2.

Das FDM 2 läßt sich in seinem Aufbau in Digital- und Analogteil unterteilen. Zum Analogteil gehören

— Spannungsadapterstufe
— Demodulatorstufe
— Bewertungsstufe
— Integrierstufe
— Generator,

zum Digitalteil

— AD-Umsetzer
— Steuerungsstufe.

Beide Teile werden von einer gemeinsamen Stromversorgung gespeist.

• Spannungsadapterstufe

Die zu untersuchende Spannung wird entsprechend der Spannungsebene über einen Trenntransformator eingespeist. Damit wird eine Potentialtrennung zwischen der zu untersuchenden Spannung und der Versorgungsspannung des Meßgeräts hergestellt. Eine sich anschließende Spannungsebenenüberwachung hat die Funktion, das transformierte Meßsignal nur bei ordnungsgemäßem Anschluß der zu untersuchenden Spannung, d.h. entsprechend der Spannungsebene, an die nachfolgende Einheit zu schalten. Ein Amplitudenregler mit PI-Verhalten erfüllt die Funktion, auftretende zulässige Toleranzen (Spannungsabweichungen) der jeweiligen Spannungsebene zu beseitigen. Damit wird eine Bezugsgröße für die ungestörte Meßspannung von $U_e = 8$ V Wechselspannung unabhängig von den o.g. Toleranzen für die Auswertung der Flickerdosis bereitgestellt.

• Demodulatorstufe

Das Meßsignal läßt sich allgemein durch die Funktion

$$V_1 = V_\omega (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, \tag{5}$$

$\omega = 2 \pi f_1, f_1$ Grundschwingung der Netzspannung

$m = V_{sch}/V_\omega$,

beschrieben.

Nach einer durchgeführten Quadrierung gilt für das Meßsignal die nachfolgende Funktion:

$$\begin{aligned} V_1^2 = {} & \frac{V^2}{2}\left(1 + \frac{m^2}{2}\right) + \frac{V^2}{2} \cos 2 \omega t + \frac{m^2 V^2}{4} \cos 2 \omega t \\ & + \frac{m^2 V^2}{4} \cos 2 (\omega + \Omega) t + \frac{m^2 V^2}{8} \cos (\omega - \Omega) \\ & + \frac{m^2 V^2}{2} \cos (2 \omega + \Omega) t + \frac{m^2 V^2}{2} \cos (2 \omega - \Omega) t \\ & + m^2 V^2 \cos \Omega t + \frac{m^2 V^2}{4} \cos 2 \Omega t . \end{aligned} \tag{6}$$

Wie zu erkennen ist, haben alle nichtinteressierenden Elemente der Funktion neben einer kleineren Amplitude deutliche Frequenzabstände. Ein nachfolgendes Sperrfilter verbessert die Selektierung der zu untersuchenden Spannungsschwankung.

• Bewertungsstufe

Das Bewertungsfilter setzt sich aus einem Tiefpaßfilter mit Bessel-Charakteristik und einem Bandpaß mit Mehrfachgegenkopplung zusammen. In seiner Übertragungsfunktion bildet es die geforderte Amplitudenfrequenzkennlinie nach. Über den Monitoranschluß 1 kann die bewertete Momentanspannungsänderung aufgezeichnet werden.

Ein installiertes VU-Meter mit einer Zeitkonstanten von 1 s zeigt den zeitlichen Mittelwert des bewerteten Flickers an. Es dient zur Erleichterung der Meßbereichswahl des Bedieners entsprechend der gewählten Meßaufgabe. Nach dem Durchlaufen des Betragsbildners und Quadrierers wird dem Integrator das Meßsignal der momentanen Flickerempfindung bereitgestellt. Die Meßbereichsumschaltung gliedert sich in folgende Bereiche:

I	0 bis 1 $(\%)^2$ min	III	1 bis 10 $(\%)^2$ 5 min
II	1 bis 10 $(\%)^2$ min	IV	1 bis 10 $(\%)^2$ 15 min

• Integrierstufe

Das Meßspannungssignal der momentanen Flicker-Empfindung wird in einen proportionalen Strom umgewandelt und dem Integrator zugeführt. Der experimentell ermittelte Fehler führte zu maximal 50 µV/s. Das entspricht einem maximalen Fehler von ± 5 Digit je 15 min an der Anzeige des Analogdigitalwandlers.

• AD-Wandler

Der AD-Wandler liefert in jedem Meßbereich eine dreistellige Anzeige der Flickerdosis. Weiterhin liefert er ein digitales Signal bei Meßbereichsüberschreitung an den Überlaufcontroller.

• Steuerungsstufe

Der Timer liefert der Ablaufsteuerung ein Taktsignal von 1 s. Dieses Signal wird in ein 1,5- bzw. 15-min-Taktsignal geteilt und dem Zeitwahlschalter zugeführt. Durch Betätigen der Taste „Reset" werden folgende Funktionen ausgeführt:

— Integrator auf Anfangsbedingungen setzen
— AD-Wandler „Halt"
— Timer „Stop".

Mit dem Betätigen der Taste „Integrieren" wird der Meßvorgang entsprechend der gewählten Zeitdauer ausgelöst. Dabei bleibt die angezeigte Größe der Flickerdosis 50 s lang erhalten. Im Bereich 50 bis 60 s wird der Integrator auf sein aktuelles Ausgangssignal abgefragt, das nach 60 s (± 7 ms) übernommen und wiederum 50 s lang angezeigt wird. Nach Ablauf der gewählten Meßzeit stopt die Ablaufsteuerung den Meßvorgang selbständig. Das Meßsignal bleibt bis zum Betätigen der Taste „Reset" erhalten. Tritt während des Meßvorgangs eine Meßbereichsüberschreitung ein, so wird das vom Überlaufcontroler optisch angezeigt. Der Überlaufcontroler führt automatisch die „Reset"-Funktion aus und schaltet den Meßbereichsumschalter einen Bereich höher. Danach wird der Meßvorgang erneut gestartet.

• Generator

Der Generator dient zur Funktionskontrolle bzw. Eichung des Flickerdosis-Meßgerätes. Er erzeugt ein amplitudenmoduliertes Eichsignal mit einer Trägerfrequenz von 50 Hz und einer Modulationsfrequenz von 10 Hz. Bei der Auslösung der Funktionskontrolle des FDM wird ein Eichsignal erzeugt, das im Meßbereich II 10 $(\%)^2$ min Flickerdosis zur Anzeige bringt.

• Stromversorgung

Das Meßgerät kann wahlweise mit 220 V Wechselspannung oder 24 V Gleichspannung versorgt werden. Bei Ausfall einer Versorgungsspannung bzw. unzulässiger Abweichung vom Sollwert wird das gesamte Meßgerät automatisch von der Stromversorgung getrennt und der Zustand optisch signalisiert. Es ist in der Schutzklasse I ausgelegt. Der Trenntransformator und die Spannungsebenenüberwachung der Spannungsadapterstufe sind schutzisoliert.

Literatur

[1] *Sheshelenko*, u.a.: Bereich der Anwendung charakteristischer zulässiger Werte durch Beurteilung der Spannungsschwankung. Elektritschestwo (1979) 10, S. 9 bis 14

[2] Europäische Norm EN 50006. Begrenzung von Rückwirkungen in Stromversorgungsnetzen, die durch Elektrogeräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke mit elektronischen Steuerungen verursacht werden. CENELEC (NK 3) 1976

[3] TGL 43624/02. Fachbereichsstandard „Elektroenergiequalität", Qualitätsfaktoren. Entwurf 1987

[4] *Robert, A.*, u.a.: Distribution network disturbances caused by domestic appliances. A.I.M. Liege, CIRED 1979, S. 1–8

[5] CIRED-Bericht C 07 1983 des UIE-Disturbances Study Commitee

[6] IEC-REPORT, Publication 868: Flickermeter Functional and design specifikations

EA 5994

„Freon" SMT ist eine neue Reinigungsflüssigkeit, die eine intensivere Reinigung gedruckter Schaltungen ermöglicht und zugleich eine um 25% geringere ozonschädigende Wirkung als die meisten anderen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) hat. Das neue Produkt (Hersteller: Du Pont) wurde entwickelt, um die Forderung der Elektronikindustrie nach einem noch wirksameren Lösungsmittel zur Entfernung des Flußmittels von dicht bestückten herkömmlichen und gedruckten Schaltungen zu erfüllen. „Freon" SMT ist ein geschütztes azeotropes Gemisch aus FCKW 113, Methanol und einem neuartigen Chlorkohlenwasserstoff mit Stabilisator. Es läßt sich in bestehenden Chargen- und In-Line-Reinigungsanlagen verwenden, sofern sie mit geeigneten lösungsmittelbeständigen Dichtungen versehen werden. In einer Versuchsreihe konnte das neue Reinigungsmittel den sog. „weißen Belag" auf gedruckten Schaltungen, die unter ungünstigen Bedingungen und unter Verwendung eines schwach aktivierten Kolophonium-Flußmittels gelötet wurden, nahezu vollständig beseitigen. (Du Pont Informationsdienst)

KURZBERICHTE

150 Jahre technische Bildung in Leipzig

In Vorbereitung auf die technikhistorischen Veranstaltungen im Jahre 1988 sind unter der Federführung der Sektion Marxismus-Leninismus der Technischen Hochschule Leipzig folgende Studien angefertigt und in den Wissenschaftlichen Berichten der Hochschule publiziert worden.

1. Komplex
Beiträge zur Geschichte von Elektrotechnik und elektrotechnischer Bildung in Leipzig (Heft 3/1988)

— Die Entwicklung der Elektrotechnik in Leipzig bis zum Lehrfach an der Städtischen Gewerbeschule
Dr. rer. nat. *Lothar Hiersemann*, Geophysiker, Sektion Marxismus-Leninismus
— Der Leipziger Mechaniker *Emil Stöhrer*, ein früher Anwender von Erkenntnissen der Elektrophysik im 19. Jahrhundert
Dipl.-Ing. *Heinz-Otto Klas*, Elektroingenieur, Sektion Elektroenergieanlagen
— Die Elektroenergieversorgung von Leipzig von den Anfängen bis 1918
Dipl.-Ing. *Wolfgang Knörgen*, Elektroingenieur, Sektion Elektroenergieanlagen
— Die elektrotechnische Industrie und die Anwendung von Elektroenergie in Leipzig von 1870 bis 1918
Dipl.-Ing. *Jörk Finke*, Elektroingenieur, Sektion Elektroenergieanlagen

2. Komplex
Das Wirken des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) in Leipzig (Heft 5/1988)

— Bemerkungen zum Wirken gewerblicher und wissenschaftlich-technischer Organisationen in Leipzig von 1763 bis 1918
Dr. rer. nat. *Lothar Hiersemann*, Geophysiker, Sektion Marxismus-Leninismus
— Das Wirken des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) in Leipzig in den Jahren 1882 bis 1932
Dipl.-Ing. *Detlef Poenigk*, Automatisierungsingenieur, Sektion Automatisierungsanlagen
— Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und der Faschismus in Leipzig
Dipl.-Ing. *Carsten Krüger*, Dipl.-Ing. *Lutz Unbekannt*, Elektroingenieur, Sektion Elektroenergieanlagen
— Die Beiträge des Sächsischen/Leipziger Bezirksvereins des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) auf die Entwicklung des deutschen Patentwesens
Dipl.-Ing. *Lutz Unbekannt*, Elektroingenieur, Sektion Elektroenergieanlagen
— Die Einflußnahme des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) in Leipzig auf die Herausbildung des technischen Sicherheitswesens
Dipl.-Ing. *Carsten Krüger*, Elektroingenieur, Sektion Elektroenergieanlagen

Die Hefte sind nur über die Technische Hochschule Leipzig, Karl-Liebknecht-Str. 132, Leipzig, 7030 zu beziehen.

S. Altmann, Leipzig EA 2854

Entwurf und Betrieb von Elektroenergie-Verteilungssystemen der Industrie und Kraftwerke (Computer—Workshop)

Für Ingenieure aus Industriebetrieben und Projektierungsbereichen sollen theoretische Grundlagen und praktische Erfahrungen ergänzt bzw. wichtige Problemlösungen in ihrem systematischen Bearbeitungsablauf behandelt und im Computerlabor (Personalcomputer) demonstriert bzw. selbst abgearbeitet werden. Damit wird eine praxisnahe interaktive Bearbeitungsweise geübt, mit der unterschiedliche Maßnahmen und Lösungen des Entwurfs und des Betriebs von industriellen Elektroenergieanlagen bewertet und optimiert werden können. Das betrifft Rekonstruktionen, Erweiterungen und Neuanlagen sowie die Aufklärung von Störungen mit Ableitung von Maßnahmen zur Verbesserung von Stabilität und Zuverlässigkeit der Versorgung.
Die Stoffvermittlung erfolgt in Lektionen, die durch Problemdiskussionen gefestigt und durch Computeranwendungen ergänzt werden.
Spezielle Probleme der künftigen Entwicklungen auf diesem Gebiet werden in Rundtischgesprächen erörtert. Technische Exkursionen zu wichtigen Elektroenergieanlagen ergänzen das Programm.

Lektionen

- Probleme des Entwurfs und Betriebs von Elektroenergieverteilungssystemen der Industriebetriebe und Kraftwerke (Einführungsvortrag)
- Strategien des Entwurfs von Industrienetzen
  — Forderungen der Abnehmer
  — Klassierung der Zuverlässigkeit und der Vorzugsschaltungen
  — Systematischer Entwurf von Haupt- und Ergänzungsstrukturen
  — Interface zwischen öffentlichem und industriellem Netz
- Hochlauf und Stabilität von Antrieben mit Asynchronmotoren
  — Beschreibung des Anlauf- und Stabilitätsverhaltens
  — Maßnahmen zur Verbesserung der Stabilität
  — Systematische Lösungsstrategie
  — Computerprogrammanwendung
- Hochlauf von Antrieben mit Synchronmotoren
  — Beschreibung des Hochlaufverhaltens, Computermodell
  — Beurteilung der Hochlaufsicherheit (Drehmomenteneinsattelung) und Bestimmung der Hochlaufzeit
  — Ermittlung der Ströme, Spannungen und Drehzahl
  — Ermittlung der Pendel- und Torsionsmomente
  — Maßnahmen zur Gewährleistung der Hochlaufbedingungen
  — Computerprogrammanwendung
- Stabilität von Synchronmaschinen
  — Beschreibung des Stabilitätsverhaltens
  — Maßnahmen zur Verbesserung der Stabilität
  — systematische Lösungsstrategie
  — Mikrorechnerprogramme in einem Chemiebetrieb
- Zuverlässigkeitsbewertung
  — Beschreibung der Minimal-Schnitt-Methode
  — systematische Lösungsstrategie zur Verbesserung der Zuverlässigkeit
  — ökonomische Bewertung der Zuverlässigkeit und der Ausfallfolgen
  — Computerprogrammanwendung
- Blindstromkompensation in Mittel- und Niederspannungsnetzen
  — Analyse der Verluste und der Spannungsqualität
  — Systematische Lösungsstrategie zur Verbesserung von Verlusten und Spannungsqualität
  — Verfahren zum Entwurf von Mittelspannungskondensatoranlagen
  — Computerprogrammanwendung
- Kurzschlußgrößen
  — Theorie und Verfahren
  — Berechnung der charakteristischen Kurzschlußgrößen nach IEC
  — Berechnung und Auswertung von Kurzschlußstromverläufen von Synchrongeneratoren und -motoren
  — Berechnung und Auswertung der Kurzschlußstromverläufe von Drehstromasynchronmotoren und Drehstromasynchronmotorengruppen
  — Computerprogrammanwendungen
- Funktionelle Bewertung der Zuverlässigkeit der Einspeisungen von Abnehmerkomplexen durch das öffentliche Netz
  — Beschreibung des Verhaltens von Netz und Abnehmer
  — Modelle und Kriterien für Entscheidungen
  — Ablauf des Verfahrens
  — Computerprogrammanwendung
- Bewertung der Elektrosicherheit elektrotechnischer Anlagen
  — Theoretische Grundlagen und Modelle
  — Verfahren zur systematischen Beschreibung
  — Maßnahmen zur Verbesserung der Elektrosicherheit
  — Computerprogrammanwendung
- Analyse und Bewertung der Elektroenergiequalität
  — Änderung der Elektroenergiequalität unter dem Aspekt „Energetischer Wirkungskreis"; Definitionen
  — Bewertungsfaktoren der Elektroenergiequalität und ihre Koordinierung
  — Statistisches Modell der Koordination, seine Anwendung und Computerprogramme
  — Systematische Strategie zur Verbesserung der Elektroenergiequalität; Meßtechnik
- Lastführung von Industrienetzen mit Expertensystem
  — Beschreibung des Abnehmerverhaltens als stochastische Zeitfunktion; Modellierung
  — Methoden zur Beurteilung des Lastverhaltens bezüglich gestellter Zielfunktionen
  Vergleich mit situationsabhängigen Sollasten (Freibeträge, Überlastungen)
  Ableitung von Maßnahmen zur energieökonomischen Netzführung
  — Prognostizieren von Belastungen
  — Anforderungen an den Software-Entwurf (Elemente der künstlichen Intelligenz) und Beschreibung der Entwurfsstrategie (Expertensystem)
  — Computerprogrammanwendung

- Spezifikation und Analyse von Prozeßleittechnik-Software
  - Prozeßanalyse auf der Basis eines Zustandsgraphen (GRAPHGEN)
  - Spezifikation modularer leittechnischer Aufgaben auf der Basis des Zustandsgraphen (MODEDI)
  - Nutzung der Ergebnisse der Prozeßanalyse für die Betriebsführung (Deduktion)
  - Computerprogrammanwendung zum Problemkreis
- Stromrichteranlagen und Netzrückwirkungen
  - Theorie und Verfahren
  - Maßnahmen zur Beeinflussung der Rückwirkungen
  - Computerprogrammanwendung
- Entwurf von Erdungsanlagen
  - Theoretische Grundlagen und Modelle
  - Verfahren nach IEC
  - systematische Lösungsstrategie für Sicherheit und Ökonomie
  - Computerprogrammanwendung
- Arbeiten unter Spannung (HS, MS, NS)
  - Technologische Verfahren
  - Ökonomischer Nutzen
  - Anwendungen (Film, Besichtigung)
- Erzeugnisinformationssystem für Planung und Entwurf von EES
  - Erzeugnisdatenspeicher
  - Geräteauswahl
  - Computerprogrammanwendung
- Demonstration weiterer Computerprogramme

Zu allen Lektionen wird Arbeitsmaterial zur Verfügung gestellt.

Rundtischgespräche

- Begrüßungsabend: Bekanntmachen mit den Arbeitsgebieten der Teilnehmer
- Ausbildung an der THL und an der Sektion Elektroenergieanlagen
- Zuverlässigkeitsproblematik aus der Sicht internationaler Konferenzen
- Einsatz und Anschluß nichtkonventioneller Leitermaterialien
- Das Elektroenergieverbundsystem MIR der RGW-Länder
- Abschluß-Veranstaltung

Technische Exkursionen (Auswahl)

- Chemiebetriebe
- Umspannwerk
- Trainingsstätte für Arbeit unter Spannung
- Trainingsstätte für Schalthandlungen
- Hochleistungsprüffeld Berlin
- Pumpspeicherwerk

Realisierung

- 3-Wochen-Lehrgang in Leipzig (Referentenkollektiv unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. *F. W. Kloeppel*, THL/SEA)
- Einwöchige Lehrgänge außerhalb Leipzigs bei entsprechender Übernahme der Organisation durch Betriebe
- Durchführung bei mindestens 25 Teilnehmermeldungen

Anfragen

und weitere Auskünfte beim Veranstalter:
Technische Hochschule Leipzig
Sektion Elektroenergieanlagen
Karl-Liebknecht-Str. 132
Leipzig — 7030
F. W. Kloeppel, Leipzig EA 2739

cigré – 32. Session (Fortsetzung)

SC 11: Rotierende Maschinen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. *M. Kahle*

Folgende Schwerpunkte standen zur Diskussion:

- Fortschritte bei der Entwicklung rotierender Maschinen
- Überwachung und Diagnostik zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und zur Verbesserung der Betriebsführung vorhandener Maschinen
- Lebensdauerbeeinflussung elektrischer Maschinen durch das Schwingungsverhalten.

Die vorgelegten 14 Berichte und die umfassende Diskussion sind die Basis für die nachstehend genannten Ergebnisse und Schlußfolgerungen:

In den letzten Jahren ist in den meisten Ländern die Steigerungsrate der Elektroenergieerzeugung reduziert worden oder stagniert zeitweise völlig. Damit entfällt auch die Notwendigkeit des Einsatzes größerer Leistungseinheiten bei Generatoren gegenüber den derzeitigen Möglichkeiten. Der Entwicklungsschwerpunkt hat sich auf die Erhöhung des Wirkungsgrades und der Zuverlässigkeit verlagert.

Es wird eingeschätzt, daß keine der absehbaren Technologien zur Umwandlung der Primärenergie höhere Leistungen als 2000 MW je Generatoreinheit im nächsten Jahrzehnt erforderlich macht. Hersteller großer Maschinen meinen, diese Grenzleistung mit konventioneller Technik beherrschen zu können. Die Diskussion zeigte, daß bis zum Ende dieses Jahrhunderts auch Maschinen genügend hoher Zuverlässigkeit mit supraleitender Erregung (Heliumkühlung) mit vergleichbarer Leistung bei Bedarf verfügbar sein könnten. Zum Einsatz von Hochtemperatursupraleitern (HTSL) können gegenwärtig nur Aussagen über mögliche Zuverlässigkeitserhöhung, Abmessungsreduzierung, Kostensenkung für die Kühlung u.ä. gemacht werden. Da weder die Parameter der vorhandenen HTSL ausreichen noch konstruktionsrelevante Werkstoffe verfügbar sind, ist mit echten Entwicklungen zur Anwendung in der Maschine in nächster Zukunft nicht zu rechnen.

Über weitere Fortschritte bei der Anwendung flüssigkeitsgekühlter Ständer im Hinblick auf die Verbesserung der Betriebsbedingungen wurde berichtet.

Der Aufwand bei der Prüfung von Komponenten in voller Größe oder kompletten Maschinen bei Neuentwicklungen ist sehr hoch. Die Frage nach heutigen Möglichkeiten der Anwendung der Rechen- und Simulationstechnik anstelle von Prototypprüfungen im Entwicklungsprüffeld wurde durchgängig so entschieden, daß trotz großer Fortschritte bei der Modellierung die Prüfung gegenwärtig nicht ersetzt werden kann, da die Risiken im Betrieb zu groß wären.

Diese Einschätzung hat enorme Konsequenzen hinsichtlich Prüffeldinvestitionen und Entwicklungskosten.

Die Regelung von Turbogeneratoren ist von großer Bedeutung für die Netzstabilität. Adaptive Regelungssysteme werden bereits in verschiedenen Ländern angewendet oder entwickelt. In der Diskussion wurden zu dieser Thematik verschiedene Konzepte vom einfachen Vergleich mit vorausbestimmten Daten bis zu vollen automatischen Adaptionen vorgestellt.

Theoretische und praktische Ergebnisse und Modellanalysen zur Entwicklung eines automatischen Spannungsreglers werden in einem Bericht detailliert untersetzt.

Interessante Aspekte zur Entwicklung drehzahlregelbarer Generatoren für Pumpspeicherkraftwerke wurden vorgestellt. Bei einem 22-MVA-Modell-Generator als Vorstufe für eine 400-MVA-Maschine wird anstelle einer Schenkelpolkonstruktion ein Läufer, ähnlich dem Aufbau einer Induktionsmaschine mit einer niederfrequenten Erregung (< 5 Hz) über Schleifringeinspeisung benutzt. Die Spannung wird über einen Wechselrichter bereitgestellt. Die Steuerung des Wechselrichters wie auch die Verstellung der Leitschaufeln der Turbine übernimmt ein computergestützter Regler, der den Wirk- und Blindleistungsbedarf als Eingangsgrößen verarbeitet. Ziel ist die bessere Anpassung und die Verbesserung des Wirkungsgrades bei unterschiedlichen hydraulischen Bedingungen bzw. im Teillastbetrieb. Es wurden auch Ergebnisse zur Leistungsfaktorsteuerung mit Turbomaschinen diskutiert.

Große Bedeutung wird dem Einsatz moderner Methoden der technischen Diagnostik bei großen Maschinen zur Zustandsüberwachung, Werterhaltung und Lebensdauerverlängerung beigemessen. Über eine Vielzahl von Einzellösungen von diagnostischen Verfahren wurde berichtet.

Arbeitsberichte und Diskussionen wiesen die zunehmende Bedeutung von Systemlösungen aus. Über Erfahrungen mit Expertensystemen bei der Anwendung beschränkter Modelle wurde berichtet.

Es wurde jedoch auch deutlich, daß bei dem sehr hohen Niveau der Zuverlässigkeit elektrischer Energiewandler an das Informations-Übertragungs- und -Verarbeitungssystem hohe Anforderungen hinsichtlich Alterung und Zuverlässigkeit gestellt werden müssen.

Gegenwärtig wird die Hauptlinie in der entscheidenden Verbesserung der Verarbeitung von Meßgrößen durch Anwendung störsicherer Computertechnik und im Ausbau entsprechender Softwarestrategien gesehen. Die Anzahl der zu verarbeitenden Informationen und die Komplexität der Auswertung steigen an. Es wird in Zukunft eine stärkere Einbeziehung neuer Meßgrößen und die Entwicklung spezifisch dafür geeigneter Sensoren sowie eine angepaßte Signalübertragung erwartet.

Die Indikation von Alterungsvorgängen und die Ableitung von Zuverlässigkeitsgrößen sowie der Restlebensdauer, insbesondere der Isolierung stehen weiterhin im Vordergrund der Überwachungs- und Diagnoseaufgaben. Eine auf der Basis von differentiellen Alterungsvorgängen im Isoliersystem vorgeschlagene Meßgröße konnte, untersetzt durch viele Einzelergebnisse unterschiedlicher Institutionen, leider nicht als tragfähige Diagnostikgrundlage für die Restlebensdauerbestimmung an komplexen Isolierungen bestätigt werden. Es zeigt sich immer deutlicher, daß bei Isolierungen großer Maschinen der Nachweis der Veränderung einer einzelnen Meßgröße nicht ausreicht.

Diskrepanzen zwischen IEEE-Empfehlungen zur relativen Durchschlagfestigkeit von Windungsisolierungen und Erfahrungen bei großen Antriebsmaschinen führten zu systematischen Untersuchungen einer großen Anzahl von Maschinen im Leistungsbereich von 0,5 bis 50 MVA, 4 bis 14 kV, mit unterschiedlicher Betriebsdauer (5×10^2 bis 2×10^5 h) im Netz. Die beim Schalten mit Luft- und Vakuumschaltern etwa gleichermaßen registrierten Überspannungsfaktoren lagen bei maximal 4,6 (bezogen auf den Scheitelwert der Leiter-Erde-Spannung). Die mit Impulsen mit Anstiegszeiten von 100 ns gemessenen Festigkeiten der Windungsisolierung lagen jedoch 5- bis 10mal höher als die Betriebsfeldstärke. Schlußfolgernd kann festgestellt werden, daß bei normaler Isolierungsausführung guter Qualität keine Schutzbeschaltung erforderlich ist. Wünschenswert wäre eine Qualitätskontrolle nach Formierung und Einbau der Spulen. Die Impulsfestigkeit sollte künftig ein zusätzliches Spezifikationsmerkmal sein. Optimale Anschluß- und Erdungsbedingungen senken die Überspannung und erhöhen die Zuverlässigkeit.

Bei statischer Erregung großer Maschinen treten an der Generatorwelle häufig Spannungsspitzen auf, die wahrscheinlich auf kapazitive Einkopplung von hochfrequenten Schaltüberspannungen der Stromrichter zurückzuführen sind. Befürchtungen über mögliche Entladungserosionen an den Lagern wurden geäußert. Eine Ladungsabführung über Bürsten wird für problematisch gehalten, Vorschläge für eine Funktionsüberwachung wurden gemacht.

Der Einfluß des Schwingungsverhaltens von Maschinen auf die Lebensdauer stand erneut zur Diskussion. Die Untersuchungen der letzten Jahre zeigen, daß bei einem sinnvollen Systembetrieb die Torsionseffekte an der Welle keine so hohe Gefährdung darstellen, wie bisher angenommen wurde. Trotzdem sehen manche Betreiber eine Langzeitüberwachung vor.

Die Schwingungsüberwachung von Statorwicklungen konnte als wesentliche Möglichkeit zur Vermeidung von Havarien und zur Entscheidung für einen begrenzten Betrieb bis zur planmäßigen Instandsetzung ausgewiesen werden.

Faseroptische Sensoren sind zu diesem Zweck bereits in einigen Fällen im Betriebseinsatz.

EA 2957

SC 15: Isoliermaterial

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. *M. Kahle*

Die Berichte und Diskussionsbeiträge konzentrierten sich auf die nachstehenden Schwerpunkte:

— Neue Ergebnisse auf dem Gebiet der Anwendung synthetischer Isoliergase, insbesondere zur Festigkeit solcher Isolierungen bei Einwirkung von schnellen transienten Spannungen (fast transients FT, very fast transients VFT)

— Empfindliche analytische Nachweismethoden zur Bestimmung von Alterungsvorgängen in festen Isolierstoffen und Methoden der beschleunigten Alterung

— Ergebnisse bei der Entwicklung neuer Isolierflüssigkeiten und Wirkung von Impuls- und Teilentladungen auf Isolieröle.

Zuverlässigkeit, Lebensdauer und entscheidende Effektivitäts- und Betriebskennziffern von elektrotechnischen Betriebsmitteln und Anlagen werden wesentlich durch die Isolierung bestimmt. Die richtige Auswahl von Isolierstoffen, die gezielte Abstimmung von Isoliervermögen und Belastung und der Nachweis der Alterungsverläufe bilden verstärkt eine komplexe Aufgabe in Forschung und Entwicklung. Elemente dieses Komplexes waren Themen der Konferenz und sollen nachfolgend analysiert werden.

Hochspannungsgeräte und -anlagen mit synthetischen Gasisolierungen, insbesondere in Form von Schaltanlagen und Rohrkabeln, haben breite Anwendung gefunden. Nach Klärung der Probleme der elektrischen Festigkeit bei Betriebsbelastung einschließlich der Vorgänge bei gestörten schwach inhomogenen Feldern, treten zunehmend Probleme mit sehr schnellen transienten Überspannungen, ausgelöst durch Schalt- und Durchschlagvorgänge auf. In diesem Zusammenhang spielt auch die Festlegung von Prüfverfahren eine entscheidende Rolle, nicht zuletzt für die Herstellung geeigneter Prüfeinrichtungen, falls erforderlich.

Durch die vorgelegten Berichte und durch eine Vielzahl von Diskussionsbeiträgen wurden Ergebnisse gezielter, sehr stark konstruktionsorientierter Durch- und Überschlaguntersuchungen dargelegt.

Untersuchungen mit sehr schnellen transienten Überspannungen (VFT) an koaxialen Zylindersystemen mit und ohne Abstandhalter und mit und ohne stark inhomogene Störungen des Zylinderfeldes lassen den Schluß zu, daß die Spannungs-Zeit-Kurven des Durchschlages in allen Fällen über denen der kritischen Polarität der Blitzimpulsspannung liegen. Deutliche Reduzierungen der Durchschlagspannung von VFT werden bei Überlagerung mit Gleichspannung im Gegensatz zur Wechselspannung für stark gestörte Felder gefunden. Hinsichtlich der Wirkung von Abstandhaltern gibt es diesbezüglich eine Abhängigkeit von der Polarität. Die VFT-Durchschlagfestigkeit ist grundsätzlich höher als die Festigkeit bei Blitzimpulsspannung. Als wichtige Schlußfolgerung kann festgestellt werden, daß für die Auslegung und Prüfung von SF_6-Anlagen die Blitzstehspannung herangezogen werden kann und ein neuer Prüfstandard nicht eingeführt werden muß.

Weitere Untersuchungen zu gestörten Feldgeometrien erscheinen wegen der möglichen Streubandüberlappung bei positiver Polarität der VFT sinnvoll.

Die Nutzung von VFT für die Untersuchung von Störungseinflüssen ist prinzipiell möglich.

Innere Entladungen an Verbindungselementen der Elektroden haben keinen Triggereffekt und keinen Einfluß auf die Durchschlagkennlinie der VFT.

Nachdem die Hauptprozesse der Alterung fester Isolierstoffe, wie thermischer Abbau und elektrische bzw. mechanische Degradation, in ihren Grundzügen verstanden werden und grob quantifizierbar sind, können technologische, konstruktive und werkstofftechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer eingeleitet werden. Nunmehr treten Gesichtspunkte der Wirkung von chemischen Verunreinigungen und Zusätzen auf die Lebensdauer, z.B. im Zusammenhang mit elektrischem Treeing und der Water-Tree-Entwicklung in hochwertigen Kabelisolierungen, stärker in den Vordergrund. Zu beachten sind jedoch auch physikalische Veränderungen der Hohlraumgröße und -verteilung und der Änderung der Struktur. Bekannte physikalische Effekte und Meßverfahren werden jetzt stärker auf ihre Brauchbarkeit und Anwendungsfähigkeit für die Fremdstoffanalyse und die Herstellung einer Verbindung zum Alterungsprozeß untersucht.

Ergebnisse wurden hinsichtlich der Untersuchungsmethoden an PE-, XLPE- und EPR-Isolierungen dargestellt. So eignen sich prinzipiell die Mikroinfrarotspektroskopie und die energiedispersive Röntgenspektroskopie für den Wassernachweis bzw. Ionennachweis in Water-Trees. Sehr niedrige Oxidationsniveaus in gealterten Kabelisolierungen können mit Hilfe der Chemolumineszenzspektroskopie noch nachgewiesen werden. Auch Kombinationen von Thermogravimetrie, Gaschromatographie, FT-IR-Spektroskopie und Massenspektroskopie sind für den Fremdstoffnachweis und von flüchtigen Degradationsprodukten anwendbar.

In der Diskussion wurde deutlich, daß häufig lokalisierte Veränderungen für die Lebensdauer entscheidend sind und nur mit Mikro- oder kombinierten Methoden erfaßt werden können. Untersuchungen an gealterten Kabeln ermöglichen teilweise Rückschlüsse auf Konstruktion, Technologie und Materialreinheit. Zu betonen ist, daß es sich vorläufig nicht um Vor-Ort-Methoden handelt, sondern um Methoden der funktionellen Korrelation zwischen Material, Belastung und Wirkung. Sie ermöglichen jedoch einen Einblick in Alterungsabläufe für die Modellierung solcher Prozesse und die Ableitung praktischer Schlußfolgerungen.

Zum Nachweis von Antioxidantien und Zersetzungsprodukten von Vernetzungsmitteln in LDPE- und XLPE-Kabeln wird die HP-Flüssigchromatographie vorgeschlagen. Die Flüssigextraktion von Beiprodukten ist zeitaufwendig, so daß eine Extraktion flüchtiger Spaltprodukte durch erhöhte Temperatur und anschließende Gaschromatographie in bestimmten Fällen zweckmäßiger erscheint. Zur Bestimmung der thermisch oxidativen Stabilität eignet sich die Differential-Scanningkalorimetrie. Die Methode der thermisch stimulierten Ströme ist sehr empfindlich zum Nachweis von Zersetzungsprodukten und Antioxidantien. Möglichkeiten zum Nachweis von Alterungseffekten bieten auch die TE-Einsetzspannung und Phasenlagenvergleiche des Durchschlages im stark inhomogenen Feld.

Im Widerspruch zu früheren Ergebnissen steht die Feststellung, ausgelöst durch die Messung der Oxidationsstabilität, daß keine Korrelation zwischen dieser und dem Water-Treeing-Verhalten besteht.

Die Nutzung der Gaschromatographie für den Nachweis von Degradationsvorgängen im Rahmen der Ölgasanalyse bei Transformatoren ist weitgehend eingeführt. Einen wesentlich erweiterten Informationsgehalt können Methoden der Hochleistungs-Flüssigchromatographie (HPLC) bieten. Es besteht die Möglichkeit der Trennung von Komponenten nach Molekülgröße, Molmasse, Polarisierung und Ionogenität.

Hohe Empfindlichkeit zur Unterscheidung von Gasanlagerungseigenschaften, Antioxidantgehalt und anderen Additiven u.a. geben die Möglichkeit der Qualitätskontrolle und Überwachung.

Es ist bei der Alterung möglich, die degradierten Komponenten von Mischisolierungen zu erfassen und die Art der Auslösebelastung zu erkennen.

Für die Lebensdauerprognose von Isolierungen und die zweckmäßige Auswahl von Isolierstoffen wie auch zu deren zielgerichteter Weiterentwicklung sind Methoden der beschleunigten Alterung notwendig. Bemühungen um die Entwicklung einer Methode zur beschleunigten Teilentladungsalterung in Hohlräumen wurden dargestellt. Die jetzt vorliegende Meßzelle und Meßmethode (sog. Cigre II) ermöglicht den Werkstoffvergleich mit einem befriedigenden statistischen Nachweis.

Über Möglichkeiten der Einengung der Streubreite, z.B. durch Korrelation der Lebensdauer mit der Summenladung der TE oder Kombination von Konstantspannungsalterung und Restfestigkeitsbestimmung, wurde diskutiert.

Eine Arbeit weist die Vorzeichenänderung des dritten Moments der statistischen Verteilung der scheinbaren Ladung der TE im Phasenlagenbereich der Spannung als Kriterium für den Übergang zum Teilentladungsdurchschlag aus. In der Diskussion wurde anhand experimentellen Materials die begrenzte Anwendbarkeit dieses Kriteriums gezeigt.

Die vorgestellte Methode des Nachweises der Freiluftbeständigkeit von hochpolymeren Isolierungen mit verändertem Parametern gegenüber dem Testvorschlag der WG 22-10 wurde hinsichtlich der Verbesserungen des Zyklusablaufs (größere Zeitabschnitte für die jeweilige Belastung bei gleichen Proportionen) in der Diskussion akzeptiert. Die Sinnfälligkeit des sehr hohen Salzgehalts des Kontaminierungsmittels muß jedoch in Zweifel gezogen werden. Zur Frage der möglichen Anpassung der Belastungsniveaus an natürliche Einsatzgebiete wurden keine Vorschläge unterbreitet. Aus der Sicht der Materialtestung wurde von der TG 15-06-04 der Vorschlag zur Standardisierung eines komplexen Tauchtests (MGR-Test) mit flexibel wählbaren Belastungsparametern unterbreitet und die künftige Arbeit auf die bessere Einbeziehung praxisadäquater Degradationsmechanismen in den Materialtest orientiert.

In Flüssigkeits- und Mischisolierungen spielt die Gasabspaltung durch Teilentladung und die Impulsfestigkeit im stark inhomogenen Feld eine entscheidende Rolle für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Beide Größen werden von der molekularen Zusammensetzung des Isolieröls stark beeinflußt. In der Praxis sind diese Zusammenhänge bei Leistungstransformatoren und Kondensatoren bedeutsam.

Es ist wünschenswert, Methoden für eine effektive Analyse der molekularen Zusammensetzung und der Anteile von Inhibitoren, Stabilisatoren u.ä. einzusetzen. Berichte und Diskussionen zeigten, daß die Hochleistungs-Flüssigchromatographie (HPLC) hierzu einen beachtlichen Beitrag leisten kann. Das betrifft auch die Feststellung von Alterungsprodukten.

Als sehr spezifische Möglichkeit des Nachweises der Papierdegradation in Öl-/Papier-Isolierungen wurde die Furfural-Detektion herausgestellt.

Beispiele belegten die Möglichkeit, die HPLC auch für die Überwachung von Transformatoren einzusetzen.

Über die Themen und Ergebnisse der Arbeits- und Aufgabengruppen innerhalb des Studienkomitees 15 wird getrennt berichtet.

EA 2956

TAGUNGSBERICHT

Erhöhung der Zuverlässigkeit von Energieabführungsanlagen in Kraftwerken mit großen Blockeinheiten unter besonderer Berücksichtigung der schweren Havarie an einem 500-MW-Block im KW Boxberg 1987

291. Elektrotechnisches Kolloquium der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden am 6. Juli 1988

Referent: Prof. Dr. sc. techn. *H. Ambrosch*, Technische Universität Dresden

Einleitend wurden Aufbau und Netzanschaltung der 500-MW-Kraftwerksblöcke in der DDR erläutert, und dabei besonders die technischen Parameter und der konstruktive Aufbau der Hochstromableitung (U_n = 24 kV, I_n = 20 kA, l = 60 m, einpolig gekapselt, zwangsbelüftbar), der Hochspannungsableitung (U_n = 380 kV, I_n = 2 kA, l = 5500 m, durchgängig Freileitung) sowie der Netzanschaltung im UW Preilack (Doppelschienenanlage mit Umgehungsschiene) hervorgehoben.

Bezüglich der Beteiligung der elektrotechnischen Anlagen waren des weiteren Ablauf, Ursachen und Auswirkungen der schweren Havarie des Blockes 13 im Kraftwerk Boxberg am 14. Januar 1987 (ND vom 15. Januar 1987 und 22. April 1987) mit den Schwerpunkten: Verhalten der 420-kV-Hochspannungsleistungsschalter und des Schalterversagerschutzes, Gegenstand des Referats.

Schlußfolgerungen daraus wurden gezogen in bezug auf

— die Netzanschaltung großer Kraftwerksblöcke (mit oder ohne Generatorleistungsschalter)

— Zuverlässigkeitsanforderungen an die eingesetzten Schaltgeräte

— Kriterien und Wirkungsweise des Schalterversagerschutzes unter besonderer Beachtung der Spezifik von Längs- und Querfehlern

— die mathematische Bewertung der Zuverlässigkeit

— die Festlegungen von Belastungsannahmen in Standards (Extremwerte oder Durchschnittswerte mit gewissen Reserven) sowie der Reihenfolge und Gültigkeitsdauer bzw. -bereiche von Typprüfungen.

Da für eine ereignisorientierte Zuverlässigkeitsbewertung (z.B. Ausschaltversager) statistisch gesicherte Daten fehlen und zulässige Grenzwerte bisher nicht fixiert sind, werden Leistungsschalter gefordert, deren Ausfallrate als globaler Zuverlässigkeitsparameter möglichst klein ist, von denen keine systematischen Fehler bekannt sind und bei denen — bei hohen Forderungen — der Schalterversagerschutz auf möglichst wenige Leistungsschalter unterschiedlicher Konstruktion zurückgreift. Bei Vorhandensein eines Generatorleistungsschalters im Zusammenwirken mit dem Hochspannungsleistungsschalter eines Kraftwerksblockes ist das technisch gut zu realisieren. Alternative Lösungen wurden diskutiert.

In bezug auf Belastungsannahmen in Standards, Reihenfolge und Gültigkeit von Prüfungen sind die Diskussionen — auch international — sicher nie ganz abgeschlossen. Am Beispiel des Schutzgrades der Antriebsgehäuse von Leistungsschaltern wurde über Windkanalversuche an der TU Dresden berichtet, bei dem die Bedingungen eines Schlagregens nachgebildet wurden.

Abschließend wurde mitgeteilt, daß der Block 13 im KW Boxberg seit Oktober 1987 wieder am Netz ist.

H. Ambrosch, Dresden

EA 2944

Documentation

Ambrosch, H.; Bauer, H.

Mathematical Evaluation of the Failure Probability of Power Switcher Combinations with Longitudinal and Transversal Errors

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 85–88, 4 Figs., 2 Tables, 10 Equations, 4 Refs.

Starting from the reliability requirements the possibilities of a redundant error switching-off are described. By means of a mathematical model the reliability of the switcher failure protection is computed by examples and conclusions are derived.

Oswald, B.

Time-Scaled Modelling of the Electric Energy System

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 88–92, 6 Figs., 1 Equation, 15 Refs.

Time-scaled models are order-reduced state differential equation systems (partial systems), which are true for a determined time range and the parameter changes, dominating in this time range. They provide for the base of effectively computing transient states in electric energy systems. Fundamentals of model designing, using and reachable effects are described by a representative example.

Erlich, I.

Computing Electromechanical Transient States by Means of the PC-Programme NEDYN

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989), 3, pp. 92–95, 7 Figs., 1 Table, 2 Equations, 6 Refs.

On the PC-programme NEDYN of computing electromechanical transient states, especially the transient stability in electric energy systems, is reported. The newest knowledges of the modelling and algorithm designing areas have been considered in developing the programme. New models were used to the synchronous machine; they were derived systematically from the detailed equations by model reduction using the singular perturbation theory. Simulating different exciter systems and non-linear loads, combined with a user-friendly programme designing, makes possible using the programme also in routine studies of the transient stability.

Krause, J.

Quick Electromagnetic Transient States in Switching High-Voltage Asynchronous Motors

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 96–99, 4 Figs., 3 Equations, 6 Refs.

Voltage-time-curves and distribution of the voltage drops of the windings within the input coil of a high-voltage asynchronous machine during running in switching pulse waves of steep edges are computed and interpreted physically. The influence of conductor-earth-capacities at the beginning and the end of the feeding cable as a measure of the preventive overvoltage protection on the voltage distribution in the input coil is illustrated. Computing results with regard to the influence of the permittivities of the main and winding insulations on the voltage distribution are represented.

Heinze, D.; Butz, U.

Computer Aided Designing of CAD-Systems of Electric Energy Plants

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 99–101, 4 Figs., 5 Refs.

Complicated CAD-systems for TEVO-processes of electric energy plants can without computer aid whether be developed nor be maintained during the designing phase. The software tool ESYP for designing and simulating interactive processes is represented, which works on base of process sequence graphs. The illustration is made by example of process designing for projecting the switching plant.

Groß, M.; Koglin, H.-J.

Computer Aided Planning Overhead Transmission Lines under the View of Visibility

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 101–105, 14 Figs., 15 Equations, 8 Refs.

On the real perspective display of overhead transmission lines in the ground at a colour graphic display by means of graphic algorithms, specific to problems, is reported, as well as on the quantitative acquisition of the visibility of the overhead transmission line through a new picture processing algorithm as a prerequisite of the objective evaluation of the optical impression of overhead transmission lines in the ground.

Dittrich, G.

Decision Models in Expert Systems

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 105–107, 3 Figs., 1 Equation, 1 Ref.

Evaluation and decision models represent the core of expert systems. The application of powerful decentral computer techniques makes possible a comprehensive practical use of such models. A method of evaluating an industrial energy supply system is represented, considering several criteria. To the possible processing of output data under the conditions of the information deficiency is hinted.

Küttner, H.

Error Probability Oriented Use of Overvoltage Protection Devices in Low-Voltage Plants

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 107–109, 2 Figs., 1 Table, 8 Refs.

On base of the comparison parameter error probability the standardized protection and insulation levels are evaluated, the reliable overvoltage stress of unprotected low-voltage (NS) plants is computed, and consequences to the use of overvoltage limiting devices for overhead transmission lines and cable networks are derived.

Großmann, S.; Böhme, H.

To the Long-Time Behaviour of Plug Connections of the Electric Energy Techniques

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 110–111, 5 Figs., 3 Refs.

The behaviour of the resistance of a plug connector determines its long-time behaviour. In selected experiments the influence of contact material, of thermal and mechanical loads, conditioned by the environment, is studied during a period of more than one year, and the effect on the resistance behaviour is demonstrated.

Weigt, A.

Safety-Technical Evaluation of Technological Processes in the Manufacture of the Electric Energy Plant Engineering

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 111–112, 2 Figs., 3 Refs.

With the safety-technical evaluation of technological processes it is aimed for evaluating quantitatively working methods and working equipments. Fundamentals of the evaluation were elaborated and by characteristic examples through testing in practice verified.

Bauer, P.; Kröber, Th.

Proof of the Electric Energy Quality through FLICKER-Measurement

ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, pp. 112–113, 2 Figs., 6 Equations, 6 Refs.

The quality of the electric energy is evaluated by the characteristics of the voltage. The quality factors, derived from those, are related to changes of amplitude, phase angle, form, symmetry and position. To evaluating the voltage fluctuations the analytical method and the FLICKER-measuring method are useable. The only evaluation, useable to all categories, consiste in the FLICKER-measurement.

Документация

Амброш, Х.; Бауэр, Х.

Математическая оценка вероятности отказов комбинаций силовых выключателей при продольных и поперечных повреждениях

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 85—88, 4 рис., 2 табл., 10 уравн., 4 лит.

Исходя из требований к надежности рассматриваются возможности избыточного аварийного отключения. С помощью математической модели на примерах вычисляется надежность защиты от отказов выключателей и выводятся заключения.

Освальд, Х.

Временно-масштабное моделирование электроэнергетической системы

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 88—92, 6 рис., 1 уравн., 15 лит.

Временно-масштабные модели представляют собой ограниченные частично упорядоченные системы дифференциальных уравнений состояния (подсистемы), действительные для определенного диапазона времени и доминирующих в пределах данной области времени изменений величин. Они составляют основу для эффективного вычисления переходных процессов в электроэнергетических системах. Основы составления моделей, применение их и ожидаемые результаты описываются на репрезентативном примере.

Эрлих, И.

Вычисление электромеханических переходных процессов при помощи программы NEDYN для персональных компьютеров

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 92—95, 7 рис., 1 табл., 2 уравн., 6 лит.

Представляются сведения о программе NEDYN для персональных компьютеров, предназначенной для вычисления электромеханических переходных процессов, в частности переходной стабильности в электроэнергетической системе. Для синхронной машины использованы новые модели, полученные систематически из подробных уравнений с помощью сингулярного метода возмущений. Моделирование различных систем возбуждения и нелинейных нагрузок в сочетании с удобным для оператора оформлением программы позволяет применение программы и для рутинных исследований переходной стабильности.

Краузе, Й.

Быстрые электромагнитные переходные процессы при переключении высоковольтных асинхронных двигателей

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 96—99, 4 рис., 3 уравн., 6 лит.

Вычисляются и физически интерпретируются кривые изменения напряжения во времени и распределение падений межвиткового напряжения во входной катушке высоковольтной асинхронной машины при поступающих волнах крутых коммутационных импульсов. Показывается влияние на распределение напряжения во входной катушке емкостей проводник-земля в начале и конце питающего кабеля как мероприятие профилактической защиты от перенапряжения.

Хайнце, Д.; Бутц, У.

Машинное проектирование САПР для электроэнергетических установок

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 99—101, 4 рис., 5 лит.

Сложные системы САПР для процессов TEVO для электроэнергетических установок на этапе проектирования не могут ни разрабатываться ни обслуживаться без применения ЭВМ. Представляются программные средства ESIP для проектирования и моделирования взаимодействующих процессов, работающие на базе графов прохождения процесса.

Гросс, М.; Коглин, Х.-Й.

Автоматизированное при помощи компьютера планирование воздушных линий под аспектом видимости

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 101—105, 14 рис., 15 уравн., 8 лит.

Рассматривается реалистическое перспективное изображение на цветном графическом дисплее воздушных линий на территории с использованием специфичных для данной проблемы алгоритмов, а также количественный учет видимости воздушной линии при помощи нового алгоритма обработки изображения как предпосылка для объективной оценки оптического впечатления воздушных линий на территории.

Диттрих, Г.

Модели решения в экспертных системах

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 105—107, 3 рис., 1 уравн., 1 лит.

Представляется способ оценки промышленной системы энергоснабжения с учетом нескольких критериев. Обращается внимание на возможность обработки исходных данных в условиях недостатки информации.

Кюттнер, Х.

Ориентированное на вероятность ошибок применение устройств защиты от перенапряжения в низковольтных установках

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 107—109, 2 рис., 1 табл., 8 лит.

На базе эталонной величины вероятности ошибок оцениваются стандартизованные уровни защиты и изоляции, выводятся допустимая нагрузка от перенапряжения и последствия относительно применения ограничителей перенапряжения для воздушных и кабельных сетей.

Гроссман, З.; Бёме, Х.

О долговременной характеристике разъемных соединений электроэнергетической техники

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 110 и 111, 5 рис., 3 лит.

На примере выбранных экспериментов исследуется влияние контактного материала, обусловленной окружающей средой термической и механической нагрузки в течение длительного периода не менее одного года и показывается их влияние на характеристику переходного сопротивления.

Вайгт, А.

Оценка технологических процессов производства электроэнергетических установок с точки зрения техники безопасности

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 111 и 112, 2 рис., 3 лит.

Целью оценки технологических процессов с точки зрения техники безопасности является количественная оценка методики работы и рабочих мест. Разработаны основы оценки и проверены на практике на характерных примерах.

Бауэр, П.; Крёбер, Т.

Оценка качества электроэнергии путем измерения фликкер-эффекта

ELEKTRIE, Берлин 43 (1989) 3, стр. 112 и 113, 2 рис., 6 уравн., 6 лит.

Для оценки колебаний напряжения могут применяться аналитический метод и метод измерения фликкер-эффекта. Оценка, применимая для всех категорий обеспечивается только применением измерения фликкер-эффекта.

ELEKTRIE

Ambrosch, H.; Bauer, H.
Mathematische Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit von Leistungsschalterkombinationen bei Längs- und Querfehlern
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 85–88 4 Bilder, 2 Tafeln, 10. Gln., 4 Lit.
Ausgehend von den Zuverlässigkeitsanforderungen werden die Möglichkeiten einer redundanten Fehlerabschaltung beschrieben. Mit Hilfe eines mathematischen Modells werden an Beispielen die Zuverlässigkeit des Schalterversagerschutzes berechnet und Schlußfolgerungen abgeleitet.

Oswald, B.
Zeitskalierte Modellierung des Elektroenergiesystems
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 88–92, 6 Bilder, 1 Gl., 15 Lit.
Zeitskalierte Modelle sind ordnungsreduzierte Zustandsdifferentialgleichungssysteme (Teilsysteme), die für einen bestimmten Zeitbereich und die in diesem Zeitbereich dominierenden Größenänderungen gelten. Sie bilden die Grundlage für eine effektive Berechnung von Ausgleichsvorgängen in Elektroenergiesystemen. Die Grundlagen der Modellbildung, Anwendung und erzielbare Effekte werden an einem repräsentativen Beispiel beschrieben.

Erlich, I.
Berechnung elektromechanischer Ausgleichsvorgänge mit dem PC-Programm NEDYN
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 92–95, 7 Bilder, 1 Tafel, 2 Gln., 6 Lit.
Es wird über das PC-Programm NEDYN zur Berechnung elektromechanischer Ausgleichsvorgänge, insbesondere der transienten Stabilität in Elektroenergiesystemen berichtet. Bei der Programmerstellung sind die neusten Erkenntnisse auf dem Gebiet der Modellierung und Algorithmusgestaltung berücksichtigt worden. Für die Synchronmaschine wurden neue Modelle verwendet, systematisch gewonnen aus den ausführlichen Gleichungen durch Modellreduktion mit Hilfe der Singular-perturbation-Theorie. Die Nachbildung verschiedener Erregersysteme und nichtlinearer Lasten, verbunden mit einer bedienerfreundlichen Programmgestaltung ermöglicht es, das Programm auch bei Routineuntersuchungen der transienten Stabilität einzusetzen.

Krause, J.
Schnelle elektromagnetische Ausgleichsvorgänge beim Schalten von Hochspannungs-Asynchronmotoren
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 96–99, 4 Bilder, 3 Gln., 6 Lit.
Spannungs-Zeit-Verläufe und Verteilung der Windungsspannungsabfälle in der Eingangsspule einer Hochspannungs-Asynchronmaschine bei einlaufenden steilflankigen Schaltimpulswellen werden berechnet und physikalisch interpretiert. Der Einfluß von Leiter-Erde-Kapazitäten am Anfang und Ende des speisenden Kabels als Maßnahme für den vorbeugenden Überspannungsschutz auf die Spannungsverteilung in der Eingangsspule wird aufgezeigt.

Heinze, D.; Butz, U.
Rechnerunterstützter Entwurf von CAD-Systemen für Elektroenergieanlagen
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 99–101, 4 Bilder, 5 Lit.
Komplizierte CAD-Systeme für TEVO-Prozesse für Elektroenergieanlagen sind ohne Rechnerunterstützung in der Entwurfphase weder entwickelbar noch wartbar. Es wird das Software-Tool ESIP für den Entwurf und die Simulation interaktiver Prozesse vorgestellt, das auf der Grundlage von Prozeßablaufgraphen arbeitet.

Groß, M.; Koglin, H.-J.
Computergestützte Freileitungsplanung unter dem Aspekt der Sichtbarkeit
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 101–105, 14 Bilder, 15 Gln., 8 Lit.
Es wird über die realistische perspektivische Darstellung von Freileitungen im Gelände auf einem Farbgrafikbildschirm mit Hilfe von problemspezifischen Grafikalgorithmen und die quantitative Erfassung der Sichtbarkeit der Freileitung durch einen neuen Bildverarbeitungsalgorithmus als Voraussetzung für die objektive Bewertung des optischen Eindrucks von Freileitungen im Gelände berichtet.

Dittrich, G.
Entscheidungsmodelle in Expertensystemen
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 105–107, 3 Bilder, 1 Gl., 1 Lit.
Es wird ein Verfahren zur Bewertung eines industriellen Energieversorgungssystems unter Beachtung mehrer Kriterien vorgestellt. Auf die mögliche Verarbeitung von Ausgangsdaten unter den Bedingungen des Informationsmangels ist hingewiesen.

Küttner, H.
Fehlerwahrscheinlichkeitsorientierter Einsatz von Überspannungsschutzeinrichtungen in NS-Anlagen
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 107–109, 2 Bilder, 1 Tafel, 8 Lit.
Auf der Basis der Vergleichsgröße Fehlerwahrscheinlichkeit werden die standardisierten Schutz- und Isolationspegel bewertet, die zulässige Überspannungsbeanspruchung ungeschützter NS-Anlagen berechnet und Konsequenzen für den Einsatz von Überspannungsbegrenzungseinrichtungen für Freileitungs- und Kabelnetze abgeleitet.

Großmann, S.; Böhme, H.
Zum Langzeitverhalten von Steckverbindungen der Elektroenergietechnik
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 110 u. 111, 5 Bilder, 3 Lit.
In ausgewählten Experimenten wird der Einfluß von Kontaktmaterial, umgebungsbedingter, thermischer und mechanischer Belastung über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr untersucht und die Wirkung auf den Widerstandsverlauf demonstriert.

Weigt, A.
Sicherheitstechnische Bewertung technologischer Prozesse in der Fertigung des Elektroenergieanlagenbaus
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 111 u. 112, 2 Bilder, 3 Lit.
Mit der sicherheitstechnischen Bewertung technologischer Prozesse wird das Ziel verfolgt, Arbeitsverfahren und Arbeitsstätten quantitativ zu bewerten. Es wurden Grundlagen zur Bewertung erarbeitet und an charakteristischen Beispielen durch Praxiserprobung nachgewiesen.

Bauer, P.; Kröber, Th.
Nachweis der Elektroenergiequalität durch Flickermessung
ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 3, S. 112 u. 113, 2 Bilder, 6 Gln., 6 Lit.
Die Qualität der Elektroenergie wird durch die Kenngrößen der Spannung bewertet. Die daraus abgeleiteten Qualitätsfaktoren beziehen sich auf Veränderungen von Amplitude, Phasenwinkel, Form, Symmetrie und Lage. Für die Bewertung der Spannungsschwankungen sind das analytische Verfahren und das Flicker-Meßverfahren anwendbar.

Herausgeber	Kammer der Technik, Fachverband Elektrotechnik
Verlag	VEB Verlag Technik DDR-1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn. dd
Verlagsdirektor	Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*
Redaktion	Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870345) Ing. *Günther Barth*, Redakteur (Telefon 2870343)
Lizenz-Nr.	1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
Gesamtherstellung	III/18/328 Messedruck Leipzig, BT Borsdorf Borsdorf 7122
Gestalter	*Eckardt Natorp* (Telefon 2870287)
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigenannahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, Berlin 1020 PSF 201 Anzeigenpreisliste Nr. 7 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR-1157
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Bezugsmöglichkeiten DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R. E. P., 11a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS – Ústředni expedicia a dovoz tisku Praha, Slezká 11, 12000 Praha 2 PNS, Ústredna Expedicia a Dovoz Tlače Praha, Posta 022, 88547 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knijiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzéće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicationes, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana
VR Polen	C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	D. E. P. Bucaresti Piata Scintii, Bucaresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Ungarische VR	P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Osztály. P. O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Ha Noi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141–167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, 2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Leipzig, Postfach 160; DDR-7010 und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR-7010

(s. Seite 101–105)

Simulation eines Freileitungs-Abschnittes auf dem Bildschirm

durch ein Graphikprogramm zur dreidimensionalen Darstellung des Geländeabschnittes

Bild 13
Geländeabschnitt
mit 3 Masten

BS: 100/850 / BR: 400/800, $vb = 25\ \%$
$S''_{\text{Mast 1}} = 6{,}036 \cdot 10^{-6}\ \text{sr/m}^2$
$S''_{\text{Mast 2}} = 3{,}043 \cdot 10^{-5}\ \text{sr/m}^2$
$S''_{\text{Mast 3}} = 1{,}192 \cdot 10^{-4}\ \text{sr/m}^2$

Bild 14
Geländeabschnitt
mit 4 Masten

BS: 1300/10 / BR: 600/600, $vb = 25\ \%$
$S''_{\text{Mast 1}} = 9{,}497 \cdot 10^{-7}\ \text{sr/m}^2$
$S''_{\text{Mast 2}} = 7{,}787 \cdot 10^{-7}\ \text{sr/m}^2$
$S''_{\text{Mast 3}} = 4{,}088 \cdot 10^{-6}\ \text{sr/m}^2$
$S''_{\text{Mast 4}} = 4{,}033 \cdot 10^{-7}\ \text{sr/m}^2$

ELEKTRIE · Berlin 43 (1989) 3 · S. 81—120
ISSN 0013—5399

0730 3 177 027 465
KOMB KERAM WERKE
8612 #001 0156 PF 1

Lieferbar in bearbeiteten Auflagen

Grundlagen der elektrischen Meßtechnik

Von Prof. Dr. sc. techn. Werner Richter
2., bearbeitete Auflage. 308 Seiten, 322 Bilder, 38 Tafeln, Leinen,
DDR 19,— M, Ausland 32,— DM.
Bestellangaben: 5538381/Richter, Meßtechnik

Neben einer gründlichen Darstellung von Kenngrößen und Kennfunktionen für Meßeinrichtungen sowie der gesamten Fehlerproblematik enthält das Buch vor allem die für die moderne elektrische/elektronische Meßtechnik typischen Funktionseinheiten, Meßgeräte und -systeme bis hin zu Sensoren und mikroprozessorgesteuerten Meßeinrichtungen. Ebenso wird auf die sich daraus ergebenden Änderungen der Meßverfahren und -strategien eingegangen.
Das Darstellungsniveau ist auf die Verwendung als studienbegleitende Literatur in der Aus- und Weiterbildung von Ingenieuren technischer Disziplinen zugeschnitten. Viele Beispiele geben Hinweise für eine direkte Nutzung in der meßtechnischen Praxis.
Die zweite Auflage ist aktualisiert worden.

Grundlagen der automatischen Steuerung

Leitfaden und Aufgaben aus der Elektrotechnik

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Schönfeld
2., bearbeitete Auflage. 204 Seiten, 155 Bilder, 19 Tafeln, Leinen,
DDR 15,— M, Ausland 26,— DM.
Bestellangaben: 5537602/Schönfeld, Steuerung

Der Autor verfolgt mit diesem Buch das Ziel, den in der Praxis tätigen Ingenieur, besonders den Elektroingenieur, mit den Grundlagen der Automatisierungstechnik so weit vertraut zu machen, daß sich daraus unmittelbare Hilfe bei der Lösung konkreter Probleme ergibt.
Das Werk ist in neun, in sich abgeschlossene Abschnitte gegliedert, die logisch aufeinander aufbauen. Zu jedem Abschnitt gibt es eine kurzgefaßte Einführung (Leitfaden) und durchgerechnete praxisnahe Beispiele. Ausgewählt wurden die in der Elektrotechnik angewandten Methoden und Verfahren.
Entsprechend der aktuellen Entwicklung zum Einsatz digitaler Regelungen auf der Basis von Mikrorechnern werden Verfahren zur Analyse und Synthese kontinuierlicher und diskontinuierlicher Systeme parallel behandelt. Analogien und Unterschiede werden herausgearbeitet und tragen zum Verständnis der grundsätzlichen Zusammenhänge bei. Es werden sowohl Frequenzmethoden als auch Methoden des Zustandsraumes zur Analyse und Synthese genutzt. 155 instruktive Bilder veranschaulichen die Zusammenhänge. Auf 19 Tafeln sind Rechenregeln, charakteristische Parameter, normierte Kennlinien übersichtlich als Arbeitsmaterial zusammengestellt.
In dieser Auflage wurde die Konzeption beibehalten, Druckfehler wurden beseitigt sowie einige textliche Präzisierungen vorgenommen. Einige Abschnitte wurden überarbeitet bzw. neu gefaßt.

Im Fachbuchhandel erhältlich

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN